



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Gépészmérnöki Kar

Anyagtudomány és Technológia Tanszék

Szintaktikus fémhabok rugalmassági tulajdonságainak becslési módszerei

Készítette: Balázs Dávid Ágoston,
gépészmérnök szakos hallgató

Konzulens: Dr. Orbulov Imre Norbert,
adjunktus

**Tudományos Diákköri Konferencia
Budapest, 2014.**

Köszönetnyilvánítás

Hálával tartozom elsősorban konzulensemnek, aki a dolgozatom megírása során sem időt, sem energiát nem sajnálva segítette munkámat, illetve minden fontos kérdésnél ellátott jótanácsaival. Továbbá köszönettel tartozom az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a laboratóriumban elvégzett mérésekért.

Végül, tisztaszívvel köszönöm Szüleimnek és Testvéreimnek a sok gondoskodást, ami elkísért eddigi tanulmányaim során.

Nyilatkozat a kutatómunka önálló végzéséről és a hivatkozások átvételéről

Alulírott Balázs Dávid Ágoston kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalommal, de átfogalmazva, más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2014. október 26.

.....

Balázs Dávid Ágoston

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	5
2.	Szakirodalmi elemzés	5
3.	Célkitűzés	23
4.	A modellezett anyagok	24
4.1.	Erősítőanyag típusok és jellemzőik	24
4.2.	Mátrix jellemzői	26
4.3.	A vizsgált anyagok mért rugalmassági modulusza	26
5.	A homogenizációs modellek és eredményeik	28
5.1.	A homogenizációs modellek csoportosítása	28
5.2.	A klasszikus homogenizációs technikák	30
5.2.1.	A Hashin-Shtrikman-féle becslés	30
5.2.2.	A Mori-Tanaka-féle becslés	30
5.2.3.	A Voigt-Reuss-féle becslés	31
5.2.4.	Az önkonzisztens becslés	31
5.2.5.	A differenciális önkonzisztens becslés	32
5.3.	A nem klasszikus homogenizációs technikák	34
5.3.1.	Kompozit gömb alapú homogenizációs technikák	34
5.3.1.1.	A kompozit gömb alapú Hashin-Shtrikman becslés	34
5.3.1.2.	A kompozit gömb alapú Mori-Tanaka becslés	35
5.3.1.3.	A kompozit gömb alapú önkonzisztens becslés	35
5.3.2.	Az üreges erősítőanyag alapú homogenizációs technikák	36
5.3.2.1.	Az üreges erősítőanyag alapú differenciális önkonzisztens becslés	36
6.	Eredmények összegzése, következtetések levonása	39
6.1.	A modellezett anyagok közti különbségek	40
6.2.	A homogenizációs technikák hiányosságai	40
7.	A homogenizációs technikák kiegészítése	42
7.1.	A szintaktikus fémhabok porozitása, sűrűsége	42
7.1.1.	A szintaktikus fémhabok szerkezetének valós felépítése	42
7.1.1.1.	Az erősítőanyag porozitásának szerepe	43
7.1.1.2.	A törött gömbhéjak szerepe	44
7.1.1.3.	A mátrixban lévő (nemkívánt) porozitás	45
7.1.2.	A szintaktikus fémhabok sűrűségének becslésére szolgáló módszer	46
7.1.3.	Az átalakított homogenizációs technikák eredményei	47
7.2.	Az érintkezési felületeken lejátszódó kémiai reakció	49

7.2.1.	A kémiai reakció bemutatása, következményei.....	49
7.2.2.	A kémiai reakció rugalmassági tulajdonságokra vonatkozó hatásai.....	51
7.2.2.1.	Anyagkiválás a gömbhéj falából.....	51
7.2.2.2.	A gömbhéj külső felületének sérülése.....	52
7.2.3.	Az átalakított homogenizációs technikák eredményei.....	52
7.3.	A homogenizációs technikákon végzett módosítások összefoglalása.....	54
8.	Nyitott kérdések megfogalmazása.....	56
8.1.	A véletlenszerű elhelyezkedés kezelése.....	56
8.2.	Különböző méretű és tulajdonságú erősítőanyagok jelenléte a kompozitban.....	56
8.3.	A tökéletlen adhézió a hátfelületeken	57
8.4.	A gömbhéjak külső felületének degradációja	57
9.	Függelékek.....	58
9.1.	„A” függelék	58
9.2.	„B” függelék.....	58
10.	Hivatkozásjegyzék.....	59

1. Bevezetés

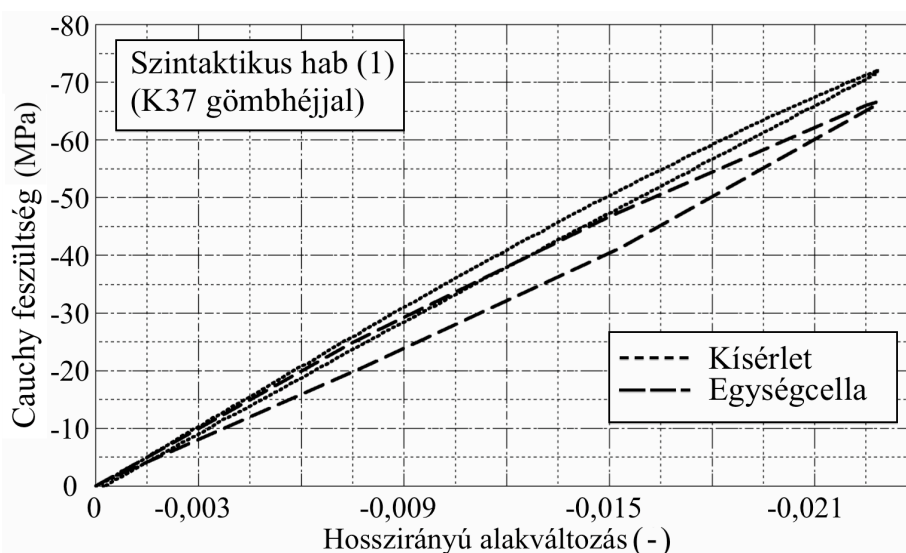
A szintaktikus fémhabok olyan kompozitok, melyek üreges gömbszerű erősítőanyagból és fémes mátrixanyagból épülnek fel. Az erősítőanyag legtöbb esetben kerámia- vagy fém gömbhéj, amelynek átmérője a néhány tized milliméteres és a milliméteres tartományban fekszik. Ezen üreges erősítőanyagnak köszönhető a nagymértékű sűrűség- és tömegcsökkenés, illetve a kompozit nagy teherbíró képessége is. Összehasonlítva más szilárd anyagokkal, polimer habokkal, a szintaktikus fémhabokat nagyobb szerkezeti merevség, nagyobb szilárdsági értékek, nagy energiaelnyelő- és rezgéscsillapító képesség jellemzi. Továbbá jó tűzállósággal bír. Ezen kedvező tulajdonságok miatt van létjogosultságuk az ipar több területén, mint például az autóiparban, hajóiparban, űrtechnológiában és harcászati területeken is egyaránt. Sokrétű és ezen speciális területeken történő felhasználásuk is bizonyítja, hogy megterülő ezen újszerű, szokásosnak nem nevezhető anyag fejlesztésével foglalkozni.

2. Szakirodalmi elemzés

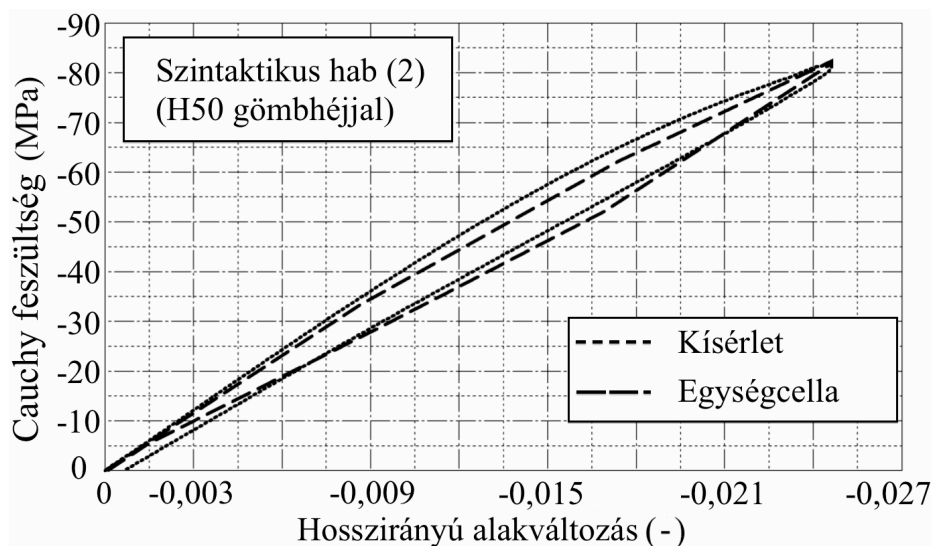
A – jellemzően polimer alapú – szintaktikus habok rugalmassági tulajdonságainak analitikus és numerikus becslésével két kutatócsoport foglalkozott behatóan, Bardella és Genna, illetve Marur és társai. Ezen kutatásokat az utóbbi bő egy évtizedben végezték, mely bizonyítja a téma újszerűségét. Ezen fejezet célja a fent említett kutatók eredményeinek bemutatása és összefoglalása.

Bardella témámhoz kapcsolódó kutatásait az ezredfordulót követően végezte. Az első számomra releváns munkája 2001-ben jelent meg, melyben egy anyagmodellt, és egy ehhez tartozó anyagtörvényt hozott létre, ami leírta az epoxi gyanta üveges állapotának nemlineáris viszkoelaszticitását [1]. Kísérleti tesztek azt mutatják, hogy a nemlineáris viszkoelaszticitás határozza meg az epoxi gyanta ciklikus viselkedését mielőtt eléri az anyag a szilárd halmazállapotot. A Bardella által létrehozott modell követi ezen ciklikus viselkedést. Számomra azért volt érdekes ez a kutatás, mert a modell sikeresen használható az üreges gömbökkel töltött epoxi mátrix – azaz szintaktikus hab – ciklikus viselkedésének numerikus homogenizálására egységcella modellek segítségével. Ezáltal előre jelezhető, hogyan fognak a feszültség- és nyúlásmezők alakulni a gyantában. Bardella két különböző szintaktikus hab mechanikai viselkedését szimulálta többtengelyű ciklikus nyomóvizsgálat esetén: egységcella

modelleken alkalmazott végeselemes analízist, melyhez felhasználta a fent említett anyagtörvényt. A két szintaktikus hab mátrixanyaga azonos epoxi gyanta, illetve az erősítőanyag tartalom egységesen 51,5 tf%. Az anyagi rugalmasságtani jellemzői: $K = 5185$ MPa, $E = 2800$ MPa, $\nu = 0,41$. Erősítőanyag szempontjából az egyikben K37 ScotchlightTM, míg a másikban H50 típusú üveg gömbhéjak találhatók [2]. A fő különbség a kettő között a sűrűségükben (előbbi: $0,37 \text{ g/cm}^3$, míg az utóbbi $0,50 \text{ g/cm}^3$, rugalmassági moduluszuk: $E=77500$ MPa, Poisson-tényező: $\nu= 0,23$), illetve az előállítás során alkalmazott kémiai folyamatban rejlik. A modellben az üveggömbhéjakat lineárisan rugalmasnak feltételezték, illetve Bardella tökéletes adhéziót feltételezett a mátrix és az erősítőanyag között. Fontos megjegyezni, hogy a kutató által megalkotott modell csak azon szintaktikus habok morfológiáját közelíti, melyeknél a hengeres alak teljes mértékben kitölti a teret, teljesen periodikus a kompozit az erősítőanyagok eloszlását tekintve, és a gömbhéjak azonos méretűek. Ez viszont nem teljesül egy valós szintaktikus hab esetén, így a modell hátránya, hogy csak közelítésként fogható fel. A végeselemes szimuláció a modellben lévő egységcellán egyenletes sebességgel csökkenő elmozdulás alkalmazásából áll, így vizsgálva a habok ciklikus viselkedését. Az analízis segítségével meghatározott feszültség- és alakváltozás értékek mérnöki közelítéssel pontos egyezést mutatnak a kísérletek eredményeivel (1/a, 1/b. ábra). Azáltal, hogy az egységcella vizsgálata mindhárom irányú feszültségállapotot tartalmazza, az így kapott eredmények egyezése a kísérleti értékekkel egy indirekt tesztelési mód is lehet.

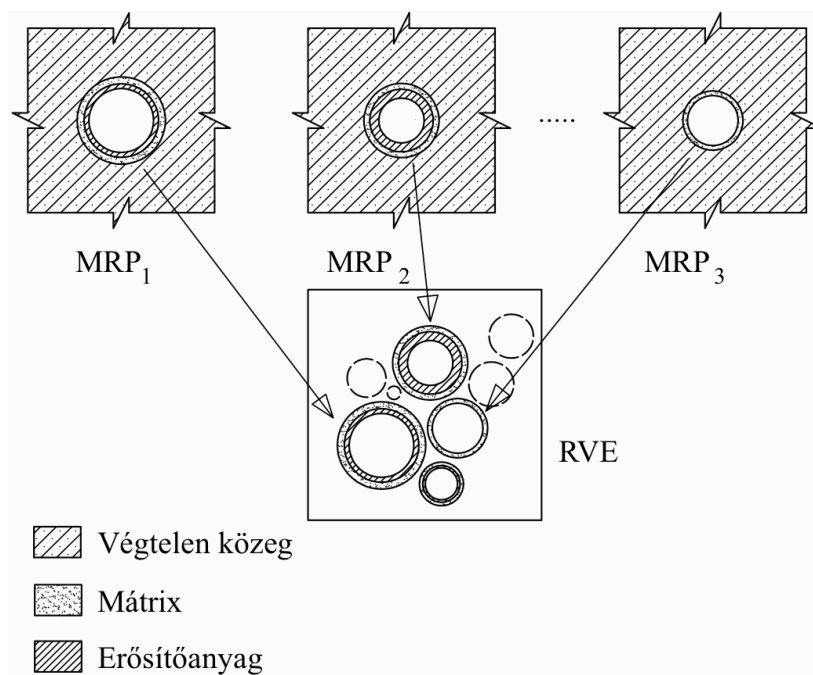


1/a. ábra: A kísérleti és az egységcella modellekből kapott numerikus eredmények összehasonlítása [1]



1/b. ábra: A kísérleti és az egységcella modellekből kapott numerikus eredmények összehasonlítása [1].

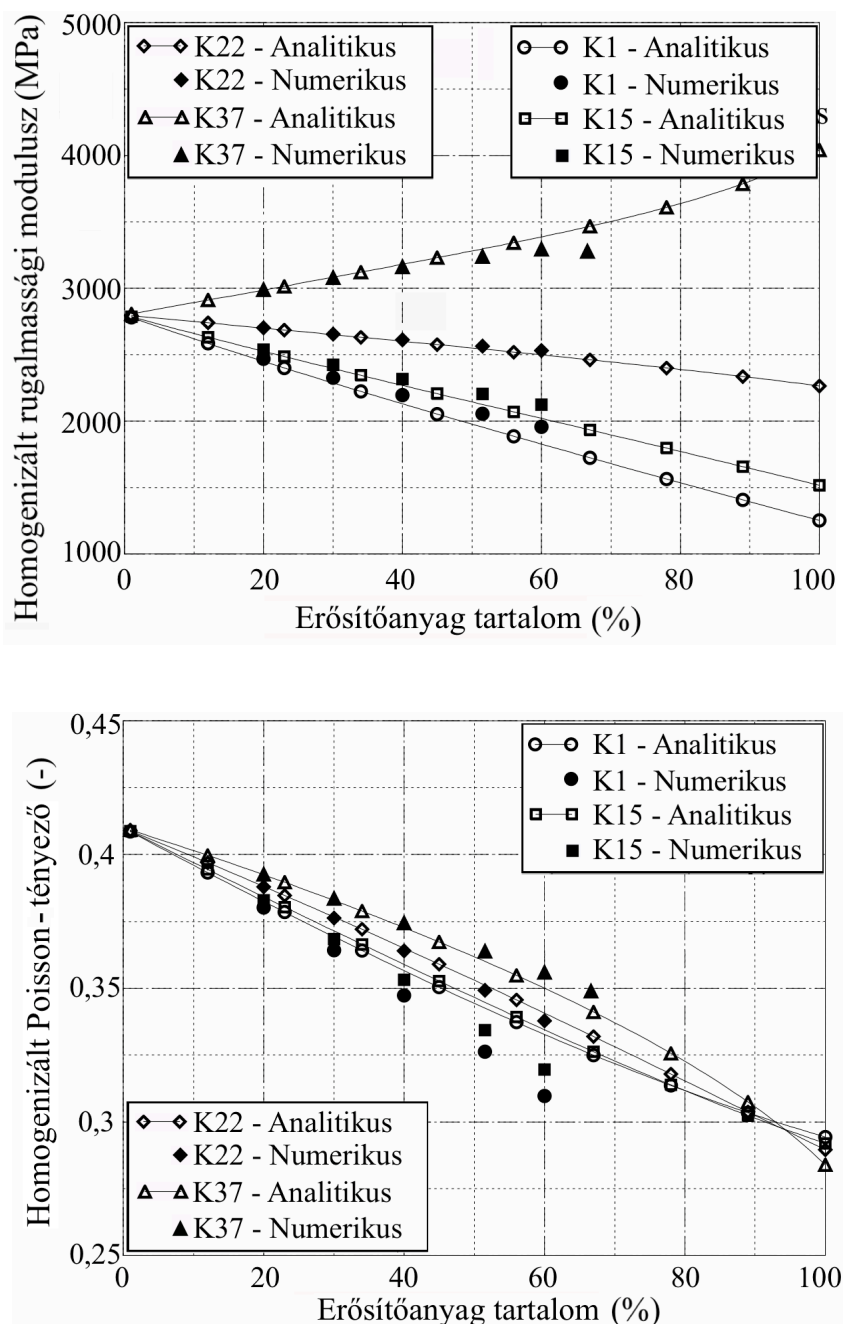
Ezt követően Bardella és Genna közös munkáját [3] tanulmányoztam, melyben polimer mátrixból és gömbhéjakból álló szintaktikus habok rugalmassági tulajdonságait határozták meg homogenizációs technika segítségével. A homogenizációs technika lényege, hogy a tanulmányban szereplő többrétegű erősítőanyaggal és nemkívánatos porozitással is bíró kompozit rugalmassági tulajdonságait meghatározzák. Szintaktikus habok homogenizációja általános folyamatokkal nem végezhető el, mert az üreges fázisok jelenléte több problémát is felvet. Helyette a Hervé és Pellegrini által kidolgozott technikát [4] terjesztették ki a szintaktikus habokra. Hervé és Pellegrini módszerével alapvetően három probléma volt gömbhéjakkal töltött habok esetén: (i) nem tudta megfelelően kezelni a nemkívánatos porozitást, (ii) csak periódikus elrendezésű lehet az erősítőanyag, és (iii) a meglehetősen bonyolult számítási módok csupán szokványos habokra léteztek. A technika kiterjesztése az MRP-kből (Morphologically Representative Patterns) felépülő RVE (Representative Volume Element) elméleten alapszik. Az MRP általánosan n számú rétegből álló erősítőanyagot és az azt körülölelő mátrixot jelenti. Jelen esetben az MRP egy végtelen, homogén közegbe beágyazott, mátrixszal körülvett, adott falvastagságú gömbhéjból álló egység, amit négyfázisú modellnek neveztek el. Az erősítőanyag tartalmat a gömbhéj falvastagságával szabályozták, ami MRP-nként különböző is lehet. Az RVE pedig ezen MRP-kből álló összetett rendszer (2. ábra).



2. ábra: Az MRP-kból felépülő RVE rendszer [5].

Ezen tanulmányban a vizsgált RVE-t izotrópnak, lineárisan rugalmasnak, valamint a fázisok közötti kapcsolat szempontjából tökéletesnek feltételezték. Az így felépített modell képes figyelembe venni az üreges fázisok jelenlétét a töltőanyagon kívül és az erősítőanyag falvastagságának változását is. A homogenizációs technika segítségével kapott analitikus eredményeket Bardella és Genna összevetette a numerikus úton kapott és a kísérleti eredményekkel. A numerikus értékeket tengelyszimmetrikus hengeres egységcella modellen végzett végeselemes szimulációból kapták. A kísérleti és a numerikus értékek összehasonlítása alapján kijelenthető, hogy a gömbhéjak falvastagságának változtatása kis mértékben befolyásolja a szintaktikus hab eredő tulajdonságait, ellentétben a nemkívánatos üregekkel, melyek jelentősen befolyásolják a homogenizációval kapott rugalmassági moduluszt. A Christensen és Lo-féle önkonzisztens becslés megfelelően pontos egyezést mutat a numerikus és a kísérleti értékekkel [6]. A numerikus és analitikus eredmények között a legnagyobb eltérés számszerűsítve 7% volt, ami még elfogadhatóan pontos egyezésnek minősül (3. ábra). Az erősítőanyag kis sűrűsége esetén a Poisson-tényezőt alulbecsülte, míg a rugalmassági moduluszok pontos egyezést mutatnak. Nagy sűrűségű gömbhéjak esetén ez fordítva történik: a Poisson-tényezőt tekintve a numerikus megoldás felülbecsülte az analitikust, illetve a rugalmassági moduluszok nagy eltérést mutatnak. Az analitikus és a kísérleti eredmények összehasonlítását öt különböző típusú szintaktikus habbal végezték el. Általánosan elmondható a kapott eredményekről, hogy az analitikus eredmények kis mértékben (3-5%) felülbecsülték a kísérleti értékeket, míg a Poisson-tényezőt gyakorlatilag

ugyanennyivel alulbecsülték. Összességében kijelenthető, hogy a cikkben leírt és megismert módszer hatékony segítséget nyújt a szintaktikus habok elemzéséhez. A technika jól alkalmazható különböző geometriájú és minőségű (típusú) erősítőanyagok esetén is, illetve a viszonylag egyszerű matematikai összefüggések miatt könnyen átültethető számítógépes algoritmusokba.

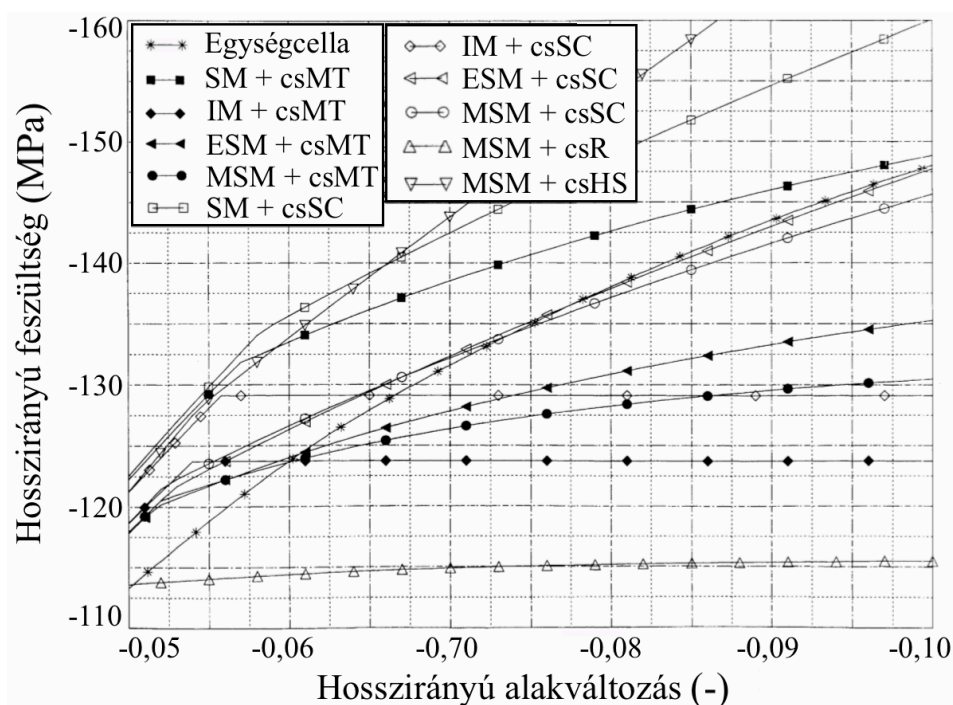


3. ábra: Az analitikus és a numerikus eredményekhez tartozó Poisson-tényezők, illetve rugalmassági moduluszok összehasonlítása [3].

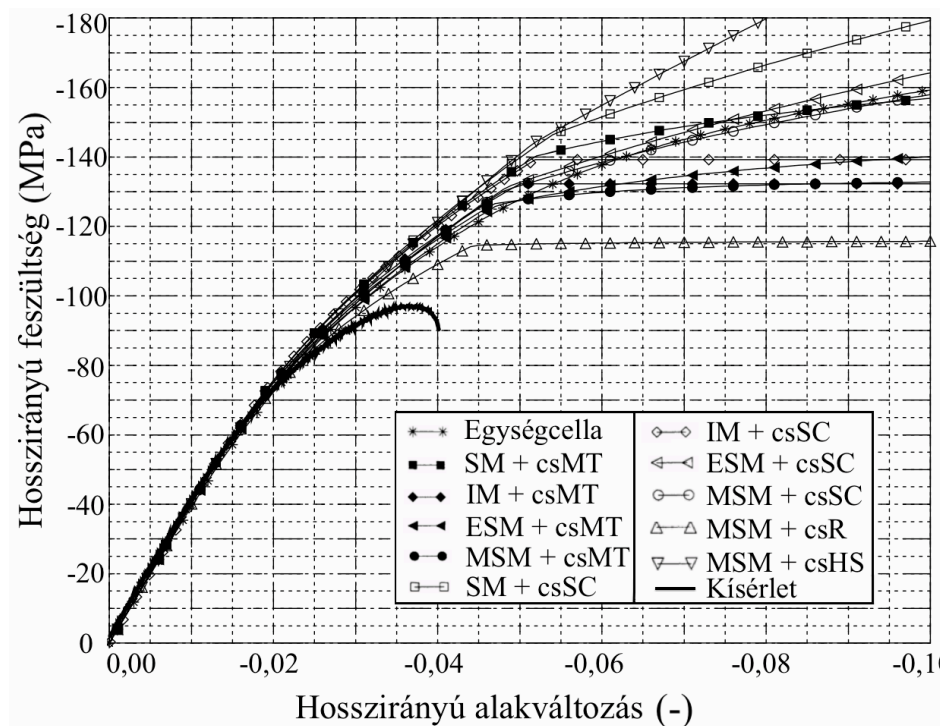
Bardella 2003-as munkájában ugyanazon probléma mélyebb és alaposabb bemutatásával foglalkozik [5]. Ismerteti az úgynevezett szekáns módszer (Secant Method) kiterjesztését, azaz a módosított szekáns módszer (Modified Secant Method) egyszerűsített

változatát. Az alkalmazott módszer LEHP (linear elastic homogenization procedure ~ lineárisan rugalmas homogenizációs eljárás) technikára épülő HBLE (homogenization of the mechanical behavior of composite materials beyond the linear elastic range ~ kompozit anyagok mechanikai tulajdonságainak homogenizálása a lineárisan rugalmas szakaszon túli tartományban), amellyel homogenizálható a kompozit a nemlineáris tartományban is, ami főként a kompozit alkotóelemeinek mechanikai tulajdonságától és mikroszerkezetétől függ. Alkalmazhatóság szempontjából kulcsfontosságú egy megfelelő LEHP választása, mellyel megkapjuk a lineáris rugalmas viselkedéshez tartozó rugalmassági konstansokat. Az LEHP-knek kétféle típusát ismerjük: a klasszikus LEHP-t, amely a referencia homogén közegbe beágyazott ellipszoid alakú homogén erősítőanyag Eshelby problémáján alapszik [7], illetve az MRP típusút [8]. A fő különbség a két típus között, hogy a klasszikus LEHP csupán konstans lokális feszültség- és deformációmezőt kezel az erősítőanyagon, míg az utóbbi esetben az MRP-k homogén részeinek változó helyi feszültségét és deformációit határozza meg. Bardella előző munkájában [3] már felépített egy MRP alapú LEHP technikát, mely képes a nemkívánatos porozitást és a gömbhéj belső üregeit is kezelni. Ahogy fentebb is említettem, a RVE különböző geometriájú négyfázisú modellekből épül fel, ami lehetővé teszi az összetettebb szerkezetű szintaktikus habok vizsgálatát is. Bardella ezen tanulmányában a kiterjesztett szekáns módszert (Extended Secant Method) alkalmazta két különböző polimer szintaktikus habon, majd az így kapott eredményeket összehasonlította a növekményes-, illetve a módosított szekáns módszer (Incremental- Modified- és a Secant Method) eredményeivel. A monoton egytengelyű viselkedés meghatározását Bardella 2001-es munkájából már ismert, két epoxi mátrixszal rendelkező szintaktikus habokon végezte el [3], a vizsgálat során tökéletes adhéziót és porozitás mentességet tételezett fel. Ezt követően végelelemes módszer segítségével nyomóvizsgálatokat végzett el a modellen, és az így kapott eredményeket összevetette a kísérletek eredményeivel. A vizsgálat célja az volt, hogy a kompozit nemlineáris rugalmas viselkedését homogenizálják. A kísérletek eredményein jól látszik, hogy a különböző technikák valóban elérik a nemlineáris tartományt, mielőtt a kísérleti szintaktikus hab tönkremenetele bekövetkezne. Általánosan kijelenthető, hogy az összes alkalmazott homogenizációs technika kellően pontos, annak ellenére, hogy ezen tartományon a növekményes és a szekáns becslések merevebben viselkednek, de ez várható is volt, mivel ezen technikák esetében különböző egyszerűsítésekkel élt Bardella. Továbbá elmondható, hogy a legjobb becslést a kiterjesztett szekáns módszer eredményezte, melyet a módosított szekáns módszer követ. A kiterjesztett szekáns módszer előnyei közé sorolható még, hogy a számításához lényegesen kisebb számítógépes erőforrás szükséges. A két

különböző sűrűségű erősítőanyaggal rendelkező szintaktikus hab kísérleti, analitikus és numerikus eredményeinek összehasonlítása a 4. és az 5. ábrákon látható.

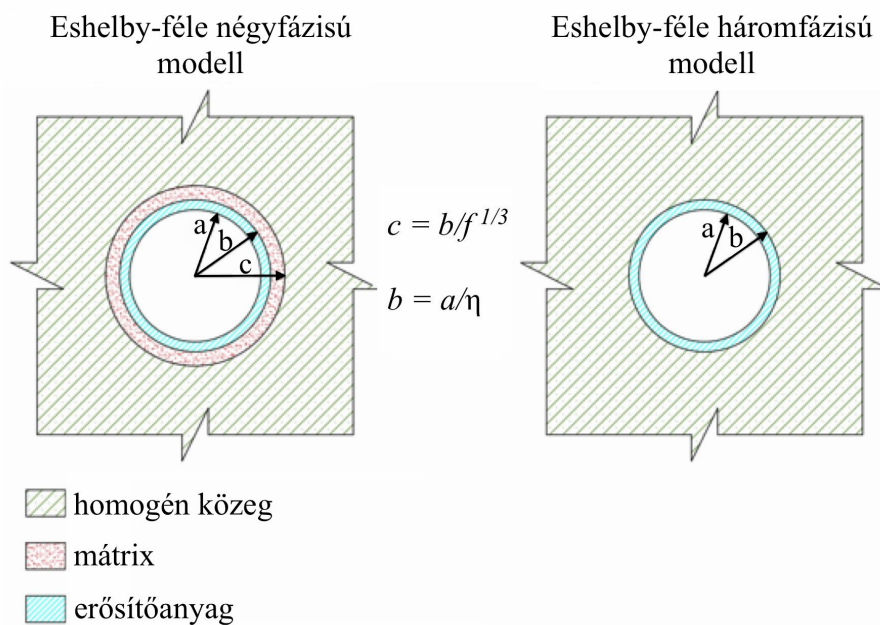


4. ábra: A kisebb ($0,37 \text{ g/cm}^3$) sűrűséggel rendelkező szintaktikus hab értékeinek összehasonlítása az analitikus és a numerikus eredményekkel. (IM – Incremental Method, SM – Secant Method, ESM – Extended Secant Method, MSM – Modified Secant Method, cs – Composite Sphere, MT – Mori-Tanaka, SC – Self-Consistent, R – Reuss, HS – Hashin-Shtrikman) [5].



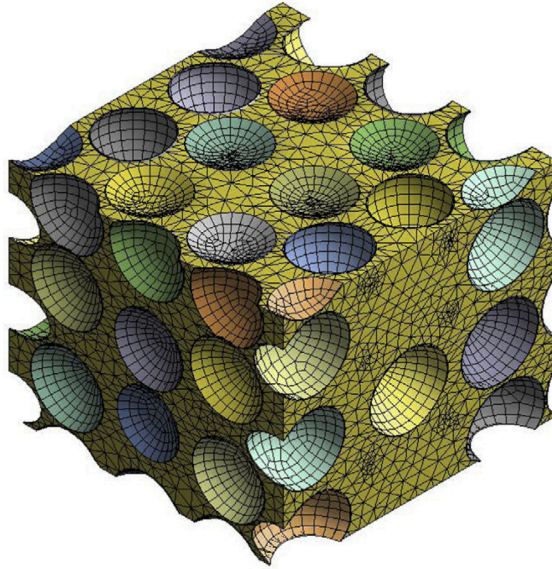
5. ábra: A nagyobb ($0,5 \text{ g/cm}^3$) sűrűséggel rendelkező szintaktikus hab értékeinek összehasonlítása az analitikus és a numerikus eredményekkel. (IM – Incremental Method, SM – Secant Method, ESM – Extended Secant Method, MSM – Modified Secant Method, cs – Composite Sphere, MT – Mori-Tanaka, SC – Self-Consistent, R – Reuss, HS – Hashin-Shtrikman) [5].

Bardella 2012-es munkájában olyan 3D-s végeselemes modelleket épített, melyek segítségével meg lehet határozni az így definiált szintaktikus hab rugalmassági tulajdonságait tetszőlegesen választott erősítőanyag tartalom, mátrix- és gömbháj-típus mellett [9]. Ezen munka fő célja az volt, hogy kiértékelje és összehasonlítsa a különböző homogenizációs technikákat. Bardella a vizsgálatok során két különböző MRP-ből indult ki. Az egyik, mely az Eshelby-féle háromfázisú (TPM) modellre épül, ezt üreges erősítőanyag modellnek nevezzük (*Hollow Inclusion* ~ HI). A másik az Eshelby-féle négyfázisú modellen alapszik, amit kompozit gömb modellnek nevezünk (*Composite Sphere* ~ CS). Az alapvető különbség a két modell között a koncentrikusan elhelyezkedő mátrixréteg, mely a 6. ábrán látható.



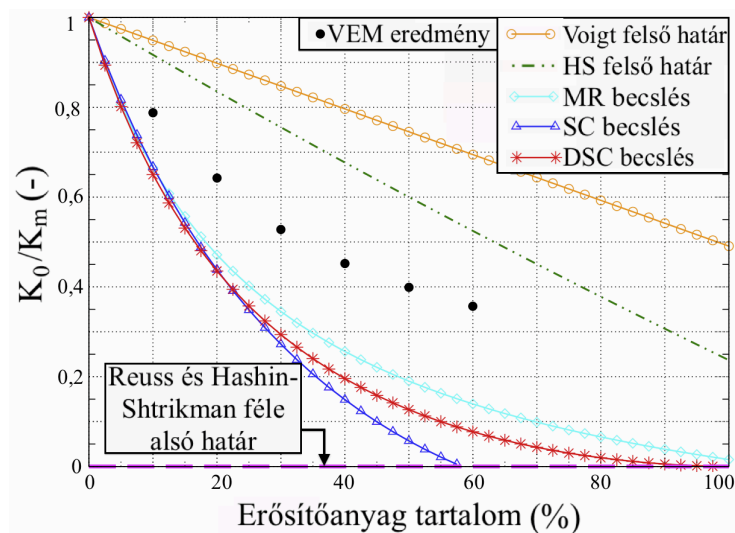
6. ábra: Az Eshelby-féle három- és négyfázisú modell [9].

Kijelenthető, hogy az ismert homogenizációs technikák közül a *klasszikus LEHP*-k nem képesek megfelelő pontossággal becsülni a szintaktikus hab rugalmassági tulajdonságait. Ezért a kutató az MRP alapú homogenizációs technikákra fektette a hangsúlyt, mint például az üreges erősítőanyag modell alapú differenciális önkonzisztens becslés (*hiDSC* ~ *hollow inclusion-based differential self-consistent*), a kompozit gömb modell alapú differenciális önkonzisztens becslés (*csDSC* ~ *composite sphere-based differential self-consistent*), a kompozit gömb modell alapú önkonzisztens becslés (*csSC* ~ *composite sphere-based self-consistent*) és a kompozit gömb modell alapú Mori-Tanaka becslés (*csMT* ~ *composite sphere-based Mori-Tanaka*). Ezen módszerek eredményeit hasonlította össze a végeselemes módszer eredményeivel, különböző erősítőanyag tartalom mellett.

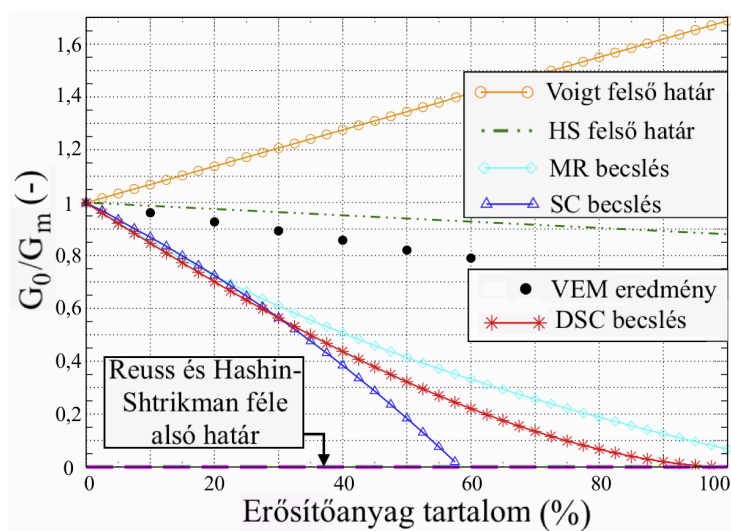


7. ábra: A tervezett végeselemes modell 60 %-os erősítőanyag tartalomnál [9].

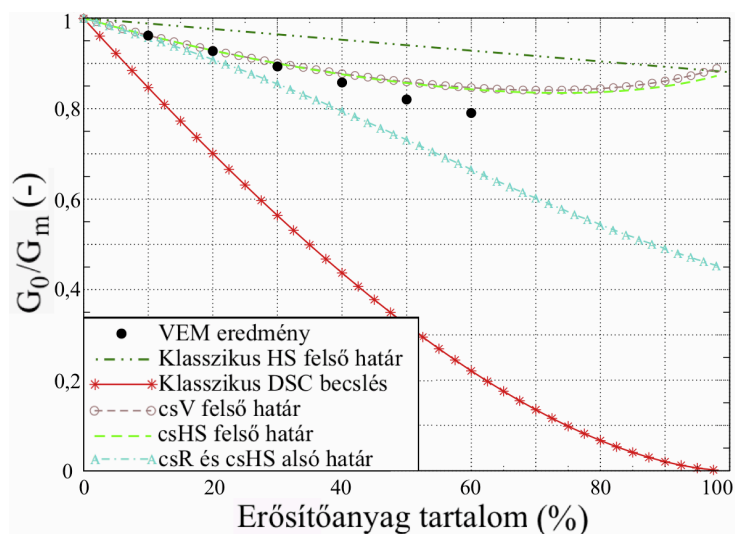
A végeselemes modellek 50 darab gömbhéjat tartalmaznak, melyek külső-belső sugarának megfelelő megválasztásával állítható be a pontos erősítőanyag tartalom. Bardella a tesztek során hat különböző töltőanyag tartalmat vizsgált, 10tf%-tól 60tf%-ig, 10 tf%-os lépésekben növelve azt. A gömböket Donev algoritmusa segítségével helyezte el, ami egy véletlenszerű, egymást nem metsző elrendezést biztosít [10], [11]. A mátrix hálózását 10 csomópontú tetraéder elemekkel, míg az erősítőanyag hálózását 4 pontos héjszerű elemekkel külön-külön végezte, majd a két különböző felület egyesítését 8 pontos elemekkel végezte el (7. ábra). A hálózás finomságát úgy választotta meg, hogy a torzult elemek száma minimális legyen, amellett, hogy a hálózás akár egy átlagos asztali számítógéppel is kivitelezhető legyen. Ezen modellek porozitását csak a gömbhéjak határozzák meg, tehát eltekint a gyártás során keletkező nemkívánatos porozitástól, továbbá a mátrixot és gömbhéjakat izotrópnak, illetve lineárisan rugalmasnak tekinti. A kísérletek során Bardella minden egyes erősítőanyag tartalomhoz meghatározta a nyíró- és kompresszibilitási moduluszokat, és dimenziótlanította ezeket a mátrix megfelelő rugalmassági értékével (G_0/G_m , ill. K_0/K_m). Eredményei alapján egyértelmű, hogy a *csSC* becslés bizonyult a legjobbnak számítási igény és pontosság terén, nagy erősítőanyag tartalom mellett is. Általánosan kijelenthető, hogy kis erősítőanyag tartalom mellett (~30 tf%) minden becslés (*csMT*, *hiDSC*, *csDSC* és a *csSC* is) megfelelően pontos értékeket szolgáltat a tesztek és a végeselemes eredményekhez képest. Ezen töltőanyag hányad felett a becslések eredményei nagyobb eltérést eredményeznek, különösen a *csDSC* becslés. Az eredmények a 8-13. ábrán figyelhetők meg.



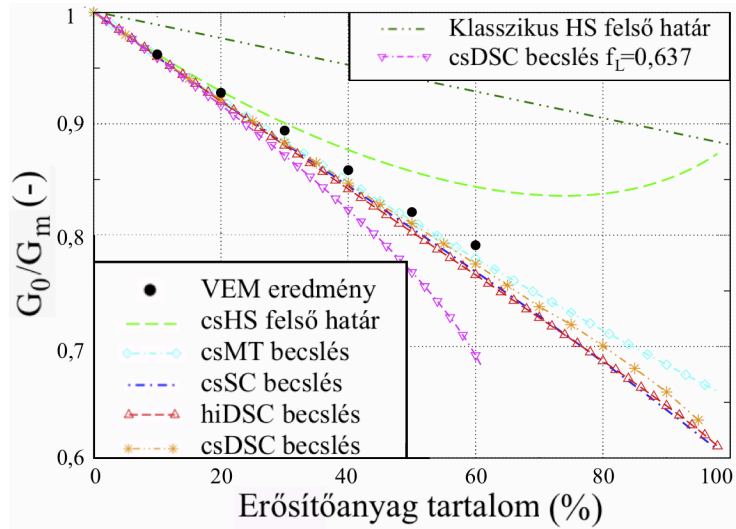
8. ábra: A klasszikus becslések és határok, illetve a VEM eredmények összehasonlítása ($E_m=2800$ MPa, $\nu_m=0,41$, $E_{ea}=70,11$ MPa, $\nu_{ea}=0,23$, $\eta = 0,98$) [9].



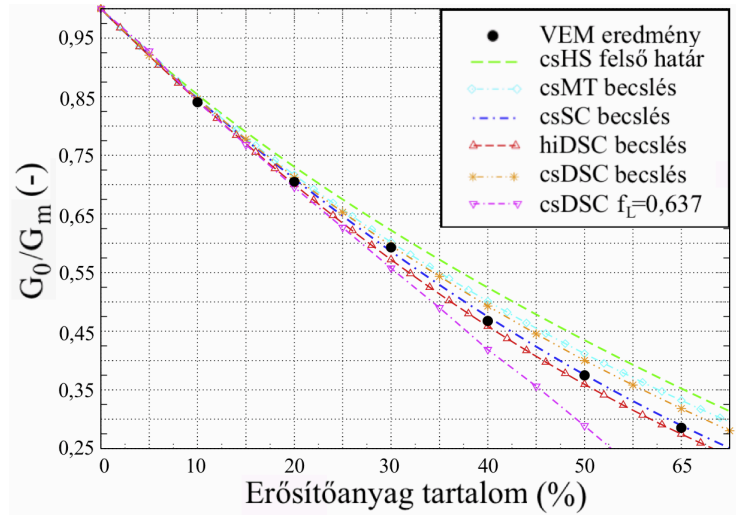
9. ábra: A klasszikus becslések és határok, illetve a VEM eredmények összehasonlítása. ($E_m=2800$ MPa, $\nu_m=0,41$, $E_{ea}=70,11$ MPa, $\nu_{ea}=0,23$, $\eta = 0,98$) [9].



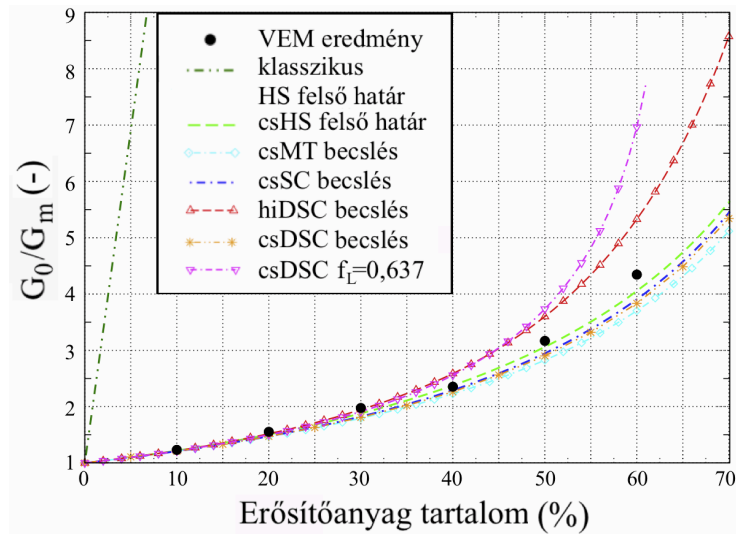
10. ábra: A klasszikus és Kompozit gömb modell alapú határok és a klasszikus differenciál önkonzisztens becslések, illetve a VEM eredmények összehasonlítása ($E_m=2800$ MPa, $\nu_m=0,41$, $E_{ea}=70,11$ MPa, $\nu_{ea}=0,23$, $\eta = 0,98$) [9].



11. ábra: a klasszikus, az MRP alapú becslések és a VEM eredmények összehasonlítása ($E_m=2800$ MPa, $\nu_m=0,41$, $E_{ea}=70,11$ MPa, $\nu_{ea}=0,23$, $\eta = 0,98$) [9].



12. ábra: a klasszikus, az MRP alapú becslések és a VEM eredmények összehasonlítása ($E_m=26$ GPa, $\nu_m=0,28$, $E_{ea}=70,11$ MPa, $\nu_{ea}=0,23$, $\eta = 0,98$) [9].



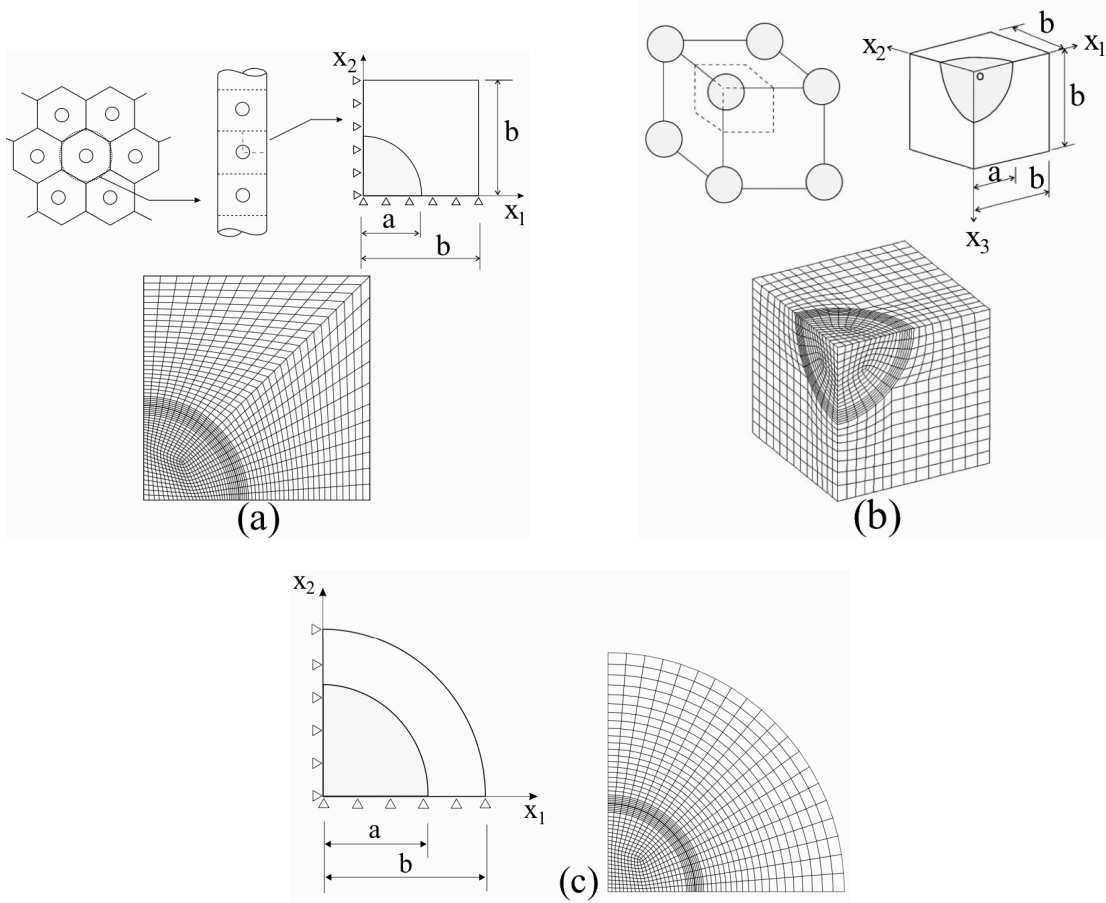
13. ábra: a klasszikus, az MRP alapú becslések és a VEM eredmények összehasonlítása ($E_m=100$ MPa, $\nu_m=0,1$, $E_{ea}=100$ GPa, $\nu_{ea}=0,4$, $\eta = 0,9$) [9].

A következő munka, amivel foglalkoztam egy 2002. évi szakmai vita feljegyzése El-Hadek és Tippur, valamint Bardella között az erősítőanyag falvastagságának szerepéről szintaktikus habok homogenizálása esetén [12], melyet El-Hadek és Tippur publikációja [13] indukált. A számítások során a habokat porózus anyagként vették figyelembe. A méréseket két különböző mátrixszal végezték el (epoxi: $E_m=3,08$ GPa (statikus), $4,16$ GPa (dinamikus), $\nu_m=0,35$; illetve uretán: $E_m=1,23$ GPa (statikus), $2,9$ GPa (dinamikus), $\nu_m=0,35$). Az erősítőanyag mindkét esetben üveg gömbhéj volt ($E_g=77500$ MPa and $\nu_g=0,23$, névleges átmérőjük $d=60\mu\text{m}$, illetve a névleges falvastagság $t=0,4\mu\text{m}$). A vita alapját az képezte, hogy El-Hadek és Tippur úgy gondolták, hogy a szintaktikus habok homogenizációját úgy is el tudják végezni, hogy elhanyagolják az erősítőanyagok falvastagságát, azaz intersztíciós üregekként kezelik a gömbhéjakat, illetve a Hashin-Shtrikman alsó határt alkalmazzák a folyamat során [14]. Ez a feltételezés azonban egy helytelen következtetés eredménye. Ha a gömbhéjakat 0 falvastagságú üregeknek feltételezzük, akkor a becslések alulmaradnak a mérésekkel meghatározott értékekhez képest. Az, hogy az így kapott értékek egybeestek a kísérleti értékekkel, csupán véletlen volt, mivel a két közelítés, amivel a kutatók éltek, gyakorlatilag semlegesítették egymást. El-Hadek és Tippur azt gondolták, hogy az alsó határt használják, viszont azt tudjuk, hogy a Hashin-Shtrikman alsó határ nullává váló merevséggel rendelkezik standard habok esetén. Tehát a számítások során a felső határral dolgoztak, amiből tévesen azt a következtetést vonták le, hogy az erősítőanyag falvastagsága nem befolyásolja a rugalmassági tulajdonságokat. Összességében kijelenthető, hogy az erősítőanyag-falvastagság az egyik legfontosabb paraméter, mely befolyásolja a szintaktikus habok mechanikai tulajdonságait, illetve a gömbök élettartamát. Hatása kizárólag rendkívül kis sűrűség vagy falvastagság esetén hanyagolható el.

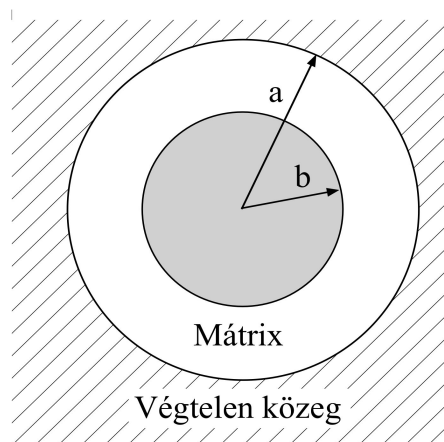
Bardella a dolgozatomban tárgyában végzett munkásságát végig követve, mélyebb és részletesebb bepillantást kaphattam a szintaktikus habok rugalmassági tulajdonságainak becslésébe.

Marur első, témámba vágó munkája 2004-ben jelent meg, célja az, hogy végeselemes módszerrel meghatározza, majd kiértékelje a gömbök körüli feszültségállapotokat, illetve a gömbszerű erősítőanyaggal ellátott kompozitok rugalmassági tulajdonságait egytengelyű, húzó igénybevétel esetén, különböző egységcella modellek segítségével [15]. Az így kapott rugalmassági értékeket az üveggömb erősítőanyagot tartalmazó, epoxi mátrixszal rendelkező kompoziton végzett kísérletek eredményeivel hasonlította össze. A feszültségmezőkhöz tartozó kísérleti értékek hiányában az egységcella modellekből származó értékeket az úgynevezett háromfázisú modell (TPM) által származtatott eredményekkel vetette össze.

Kutatása során a tengelyszimmetrikus hengeres egységcellát, a gömbszerű egységcellát, a 3D-s egységcellát és a TPM-t vizsgálta (14. és 15. ábra). Ezek használata kézenfekvő volt, mivel ezen kutatás nem foglalkozik a részecskék véletlenszerű elhelyezkedésével, periódikusnak tekinti azt.



14. ábra: (a) – hengeres egységcella, (b) – 3D egységcella, (c) – gömbszerű egységcella és végeselemes hálózás 5 tf% erősítőanyag esetén [15].

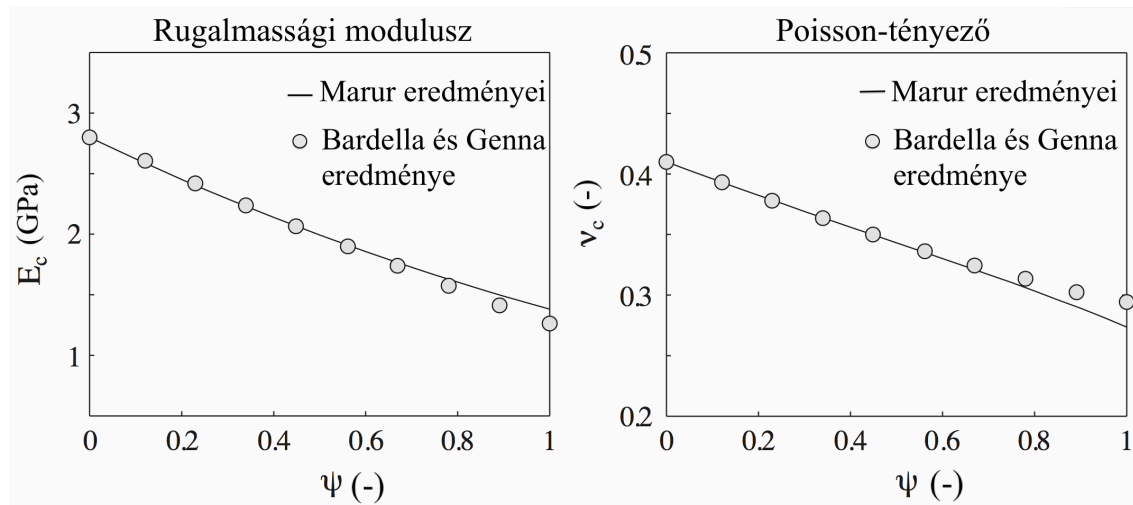


15. ábra: A háromfázisú (TPM) modell [15].

A rugalmassági értékek meghatározása során Marur kiszámította az egyes modellekhez tartozó kompresszibilitási- és rugalmassági moduluszokat, illetve a sugár- és nyírófeszültségeket, amelyekből a harmadik független változó már meghatározható. Az így kapott értékek szolgáltak alapul az összehasonlításhoz. A sugár irányú feszültséget tekintve közelítőleg 15 tf%-os erősítőanyag tartalomig a három egységcella modell közel azonos értékű, nincs nagy eltérés a TPM-hez képest. Ezen érték felett viszont jelentős eltérések mutatkoznak az összehasonlításban, – különösen a 3D modell esetében – melynek oka az, hogy növekvő térfogatszázalék esetén (ami ekvivalens az erősítőanyag sugarának növelésével) a gömb pólusa egyre jobban közelíti a mátrix szélét, és a köztük lévő elemek erősen torzulnak. A nyíró feszültségek 15 tf%-os erősítőanyag tartalomig szintén közel azonos értékűek a három egységcella modellt és a TPM-t tekintve. Növekvő erősítőanyag tartalom esetén az értékek egyre fokozódó különbségeket mutatnak, továbbá megszűnik a nyíró feszültségek szimmetriája a nyíró feszültség főtengetyére nézve, ami az anyag általános izotrópiájának elvesztéséből fakad. A kiszámított kompresszibilitási modulusz értékeknek a kísérletekből származó eredményekkel történő összehasonlítása azt mutatja, hogy a hengeres egységcella modell kivételével mindegyik jó közelítést ad a kísérleti eredményekre vonatkozólag nagy erősítőanyag tartalom esetén is. A rugalmassági modulusz esetén a gömbszerű modell szolgáltatta a legpontosabb értékeket nagy erősítőanyag arány esetén is, míg a hengeres és a 3D modellek 20 tf%-os töltőanyag tartalom felett meglehetősen pontatlanok voltak. A Poisson-tényezőt tekintve a hengeres egységcella kimagaslóan pontatlan értékeket eredményezett, ami annak tudható be, hogy a modell nem tükrözi a kompozit általános izotrópiáját. A 3D-s modell 20 tf%-os erősítőanyag tartalom felett szintén rossz közelítést ad, míg a gömbszerű egységcella értékei nagy töltőanyag tartalomnál is pontos becslést szolgáltatnak.

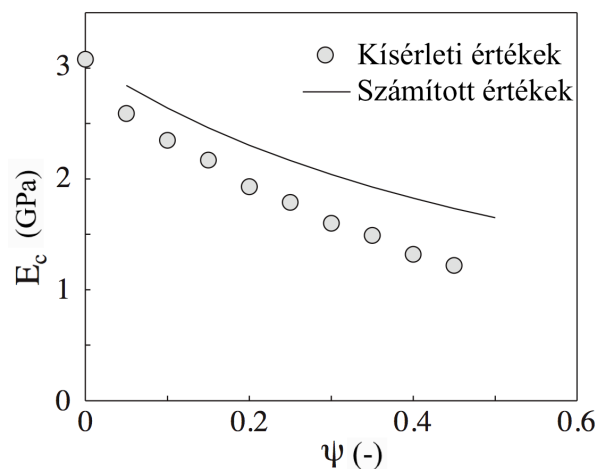
Marur második munkája a tárgyban 2005-ben jelent meg [16], melyben Fröhlich és Sack idealizált kompozitja [17] alapján határozta meg a szintaktikus habok rugalmassági moduluszait analitikus úton, koncentrikus gömbhéj modellt használva. Az alkalmazott modell annyiban tér el a fent említett TPM-től, hogy itt az erősítőanyag üreges gömb, és a modellt körülvevő végtelen közeg rugalmassági tulajdonságai nem feltétlenül azonosak a mátrixéval. Marur meghatározta a modell kompresszibilitási moduluszát és Poisson-tényezőjét, melyek segítségével meghatározható a rugalmassági modulusz is. Az így kapott értékeket összevetette Bardella és Genna elméleti modelljének eredményeivel [3] és a kísérletekből származó értékekkel [13]. Az elméleti modellek összehasonlítása során pontos egyezést figyelt meg

mind a rugalmassági moduluszt, mind a Poisson-tényezőt tekintve egészen 80 tf%-os erősítőanyag tartalomig (16. ábra).



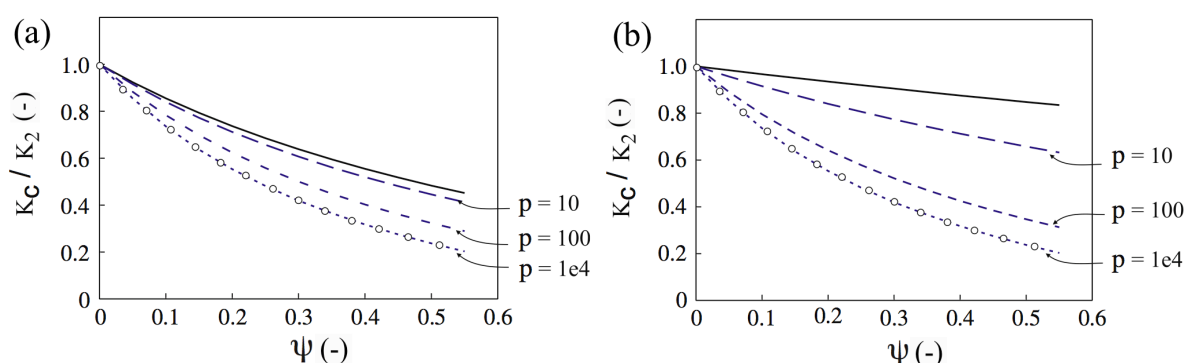
16. ábra: Az elméleti modellek alapján meghatározott rugalmassági moduluszok és a Poisson-tényezők összehasonlítása Bardella és Genna eredményeivel [16].

A számított értékek és a kísérleti adatok összehasonlítását a 17. ábra szemlélteti. Ezen látható, hogy az analitikus eredmények lényegesen felülbecsülik a kísérletek eredményeit, de ennek ellenére a köztük lévő összefüggés helytállónak bizonyult. Az eltéréseknek több oka is lehet: a közbenső porozitás jelenléte, az erősítőanyag gömbjei a valóságban az ideális esettől eltérően nem periódikusan helyezkednek el a mátrixban, illetve tökéletlen az adhézió a fázisok határain. A vizsgálatok során az erősítőanyag és a mátrix közötti kötés milyensége volt a legfontosabb, mivel a porozitás mértéke meghatározható a számolt és mért sűrűségből, illetve az erősítő szemcsék elhelyezkedése csak kismértékben befolyásolja a makroszkópikus rugalmassági moduluszt.



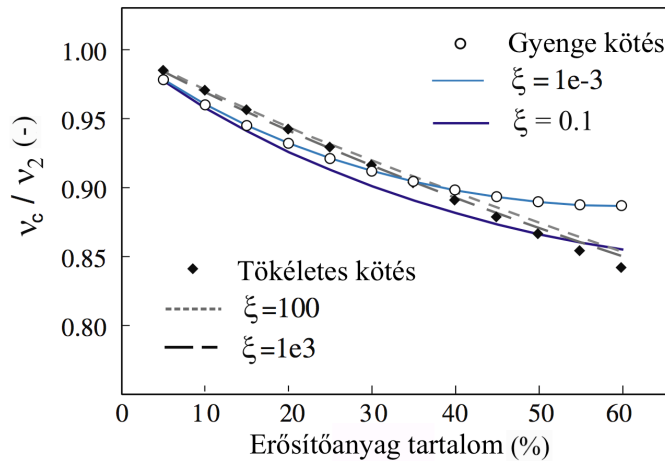
17. ábra: A kísérleti- és elméleti úton meghatározott rugalmassági moduluszok összehasonlítása [16].

Megfigyelhető, hogy az eddig említett kutatások egyikében sem esett szó az előbb említett jelenségekről. Ezen szempont szerint Marur 2009-es munkája [18] nagy előrelépésnek számít, mivel itt az analitikus megoldásokat a tökéletlen határréteg figyelembevételével származtatta, mely segítségével számításba vette az alkotóelemek közötti elcsúszást és a részlegesen felszakadt határréteget. Ehhez a korábban már használt TPM modellben egy elhanyagolható t vastagságú réteget hozott létre, mely a számításokban p adhéziós paraméterként jelenik meg. Értékét a számítások során az ezred nagyságrendű értéktől (tökéletes kapcsolat) a száz-as nagyságrendig (kötetlen állapot) változtatta (18. ábra). Az új modell segítségével a kompresszibilitási moduluszokat két különböző falvastagságú (400 és 1200 nm) erősítőanyaggal rendelkező kompozit esetében határozta meg, és hasonlította össze a kísérleti eredményekkel. Ezen esetben ez egy polimer mátrixszal rendelkező és az abban szétosztott 60 μm -es névleges átmérőjű üveg gömbhéjakból álló szintaktikus hab ($E=74\text{ GPa}$, $\nu=0,35$) volt. Az eredmények az mutatják, hogy p paraméter jelenlétére a kompresszibilitás modulusz rendkívül érzékeny.



18. ábra: Normalizált kompresszibilitás modulusz értékei " p " felületi paraméter függvényében [18]:
a) 400 nm-es erősítőanyag falvastagsága
b) 1200 nm-es erősítőanyag falvastagsága

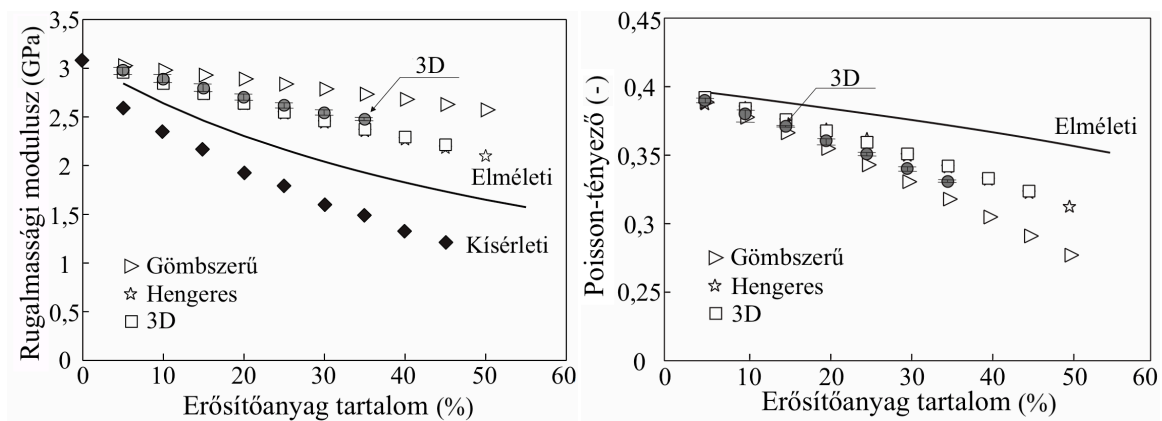
Az adhéziós paraméter növelésével a kompresszibilitási modulusz értékek egyre jobban eltérnek az ideális értékektől, és közelítik a porózus anyagét. Ez az eltérés a nagyobb falvastagság esetén még drasztikusabb, ezzel is jelzve a határréteg szilárdságának, erősségének fontosságát. A Poisson-tényező értékét a határréteg sérülése kevésbé befolyásolja, mint a kompresszibilitási modulusz esetében. Abban az esetben, ha az összehasonlítást porozitással rendelkező anyaggal végezte, a görbe platós jelleget mutatott nagyobb erősítőanyag tartalom esetén. Ezt azzal magyarázta, hogy az erősítőanyag elveszítette erősítő hatását és sejtes szerkezetű anyagként kezdett viselkedni (19. ábra).



19. ábra: Normalizált Poisson-tényező az erősítőanyag függvényében [18].

A nyíró modulusz esetében p paraméter jelenléte hasonló eredményhez vezetett, mint a kompresszibilitási modulusznál, tehát az adhézión paraméter növelésével a nyíró modulusz értéke egyre jobban közelítette a porózus anyag moduluszát. Végül Marur elvégezte az itt származtatott értékekből meghatározható rugalmassági moduluszok összehasonlítását a valós, kísérleti értékekkel. A kísérleti adatok El-Hadek és Tippur munkájából származtak [13], akik a méréseket üveg gömbhéjakat tartalmazó uretán- és epoxi mátrixon végezték el (az erősítőanyag átmérője $60 \mu m$, falvastagsága $400 nm$, anyagi jellemzője: $E=76 \text{ GPa}$, $\nu=0,35$, az epoxi mátrix jellemzői: $E=3,02 \text{ GPa}$, $\nu=0,35$; uretán mátrix jellemzői: $E=1,22 \text{ GPa}$, $\nu=0,35$). Az eredmények azt mutatták, hogy minél magasabb p értéket választott, a rugalmassági modulusz értékei annál jobban közelítették a porózus anyag viselkedését. Tehát a TPM modell kiegészítése a tökéletlen határréteggel jó közelítést adott a valós esethez hasonlítva, viszont több idealizációt is tartalmazott. Emiatt leginkább becslésre alkalmazható, és minden más anyag esetére vizsgálni kell a megbízhatóságát.

Marur 2010-es munkájában [19] a már korábban felhasznált egységcella modellek segítségével egy végeselemes vizsgálatot végzett el, amely eredményeit összevetette a már korábban említett analitikus számítások eredményeivel valamint az El-Hadektól és Tippurtól [13] származó kísérleti értékekkel. A felépített 3D-s végeselemes modell egy előre meghatározott méretű egység, melynek nagyságával egyenesen arányos az erősítőanyag sugarának mérete. A kívánt töltőanyag hányadot a gömbhéjak számával lehet beállítani. Az erősítőanyagok véletlenszerű, egymást nem metsző elhelyezését egy úgynevezett “*sphere in box*” módszer segítségével valósította meg [20]. Továbbá a modell mentes az intersztíciós porozitástól, tökéletes az adhézión és a feszültségátadás a mátrix és az erősítőanyag között, illetve minden alkotóelem lineárisan rugalmas. A fent említett értékek összehasonlítását a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra: A rugalmassági modulusz és a Poisson tényező az erősítőanyag függvényében[19].

A rugalmassági moduluszokat tekintve jól látszik, hogy mind a numerikus, mind az analitikus módszer felülbecsülte a kísérleti eredményeket. A különbség részben az intersztíciós porozitással magyarázható, valamint a tökéletlen adhézióval a gömbhéj és a mátrix között. Ha a vékonyfalú erősítőanyagot oszlatták el a mátrixban, a határfelület szilárdsága fontossá vált, mert az üreges gömbök intersztíciós üregekként viselkedtek, ha nem voltak megfelelően lekötve a mátrixban. A valós Poisson-tényezőt a végeselemes módszer- és az analitikus számítások eredménye alulbecsülte, ami a rugalmassági modulusznál említett okokból következik. A kiszámított rugalmassági moduluszból és Poisson-tényezőből meghatározható a kompresszibilitási modulusz is, melyet összehasonlítva az analitikus értékekkel, megfigyelhető, hogy a hengeres egységcellát leszámítva minden egységcella modell által származtatott végeselemes eredmény jó becslése az analitikus eredményeknek. A kompresszibilitási moduluszra vonatkozó kísérleti eredmények sajnos hiányoztak, így az összehasonlítást Marur egy olyan porózus anyaggal végezte el, amelyben a gömbhéjak falvastagsága 0, tehát csak üregeket tartalmaz. Végeredményben ezen kísérleti és számított értékek mérnöki értelemben pontos egyezést mutatnak.

Marur munkásságának ezen négy „lépcsőfokát” megvizsgálva megfigyelhető a szintaktikus habok rugalmassági tulajdonságainak becsléséhez tartozó elméletének lépésről-lépésre történő felépítése. Először is értelmezte magát a problémát, ezekhez leíró módszereket választott, így sikerült megalkotnia az egységcella modelleket. Tökéletesítette őket, bevezetett olyan fogalmakat, melyek segítségével a valósághoz közelebb álló becsléseket eredményeztek a modellek. Ezt követően összevetette ezek pontosságát a kísérletekből származó eredményekkel. Végül a felépített modellek alapján létrehozta egy szintaktikus hab 3D-s modelljét, amin végeselemes számításokat végzett.

3. Célkitűzés

Munkám fő célja, hogy a homogenizációs módszereket a szintaktikus fémhabok esetére is ellenőrizsem, illetve szükség esetén módosítsam. Ehhez elsősorban a szakirodalomban fellelhető modellek szolgáltatott kiindulási alapot. Fontos hangsúlyozni, hogy ezen módszerek jellemzően polimer mátrixszal rendelkező habok becslésére szolgálnak. Ezek alapján munkám céljának megvalósításához a következő feladatokat kellett megoldanom:

- Becslési módszerek elkészítése matematikai megoldó program segítségével, melyek felépítése a meglehetősen kevés rendelkezésre álló szakirodalom és a téma újszerűsége miatt is komplikált feladatnak bizonyult.
- Ezt követően a rugalmassági konstansokat szolgáltató modellek tesztelése a szintaktikus fémhabokra jellemző értékekkel.
- Az így kapott eredmények összehasonlítása az egytengelyű nyomóvizsgálatokból származó kísérleti eredményekkel. Ahogy az várható volt, az összehasonlítás eredményei indokolták a becslési módszerek átalakítását.
- A két habtípus között fellelhető anyagszerkezeti, morfológiai és gyártási különbségek alapján a módszerek tökéletesítése.
- Az így kapott modellek tesztelése és összehasonlítása a kísérleti eredményekkel.
- Munkám, illetve eredményeim összefoglalása és következtetések levonása, további nyitott kérdések megfogalmazása.

4. A modellezett anyagok

A munkám során vizsgált homogenizációs modelleket – a hiteles eredmények érdekében – több különböző anyagjellemzővel rendelkező szintaktikus fémhab értékeivel teszteltem. A fémhabok közti különbségeket elsősorban az erősítőanyag típusa határozta meg.

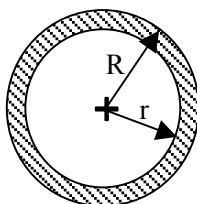
4.1. Erősítőanyag típusok és jellemzőik

A kutatás során a következő fő típusokkal foglalkoztam: A Hollomet gyártótól származó Globocer gömbhéjakkal [21] és az Envirospheres [22] cég által gyártott SL150, SL300, SSI, SLG kerámia erősítőanyagokkal, melyek 19%-ban szilícium-dioxidból (SiO_2), 33%-ban alumínium-oxidból (Al_2O_3) és 48%-ban mullitból ($3\text{Al}_2\text{O}_3$, 2SiO_2) állnak. Az erősítőanyag tartalmát a gyakorlatnak megfelelően $f=0,64$ -nak (64 tf%) választottam [23].

A kutatás során lehetőségem volt az Anyagtudomány és Technológia Tanszék laboratóriumában a gyártók által közölt értékek ellenőrzésére, így saját méréssel is alá tudtam támasztani ezen értékeket. Számomra ilyen releváns érték volt az erősítőanyagok valódi sűrűsége. A mérés lényege, hogy az előre megválasztott térfogattal rendelkező mérőedénybe a lehető legprecízebb térkitöltéssel helyezzem el a gömbhéjakat. Ezt követően megmértem annak tömegét, és az így kapott értékekből már meghatározható volt a kívánt sűrűség.

Erősítőanyag típusa	Térfogat (cm^3)	Mért tömeg (g)	Valódi sűrűség- ρ_b (g/cm^3)
Globocer	800	681,7	0,8522
SSI	800	285,6	0,3570
SL300	800	327,2	0,4065
SLG	800	345,5	0,3069
SL150	300	134,7	0,4490

1.táblázat: A különböző erősítőanyagokhoz tartozó mért és számított értékek.



21. ábra: Az erősítőanyag sematikus rajza.

Munkám szempontjából ez azért volt fontos érték, mert ennek ismeretében meg tudtam határozni az erősítőanyag külső- és belső sugarának hányadosát (21. ábra), mely bemenő értéként szolgál minden becslési módszernél. A számítást a következő összefüggésekkel végeztem el:

A gömbhéj külső- és belső sugarának hányadosát η -val jelöltem, tehát:

$$\eta = \frac{r}{R} \quad (1)$$

Továbbá a térkitöltés kifejezhető η segítségével a következő módon:

$$\frac{4/3(R^3-r^3)\pi}{4/3 R^3\pi} = \frac{R^3-r^3}{R^3} = 1 - \frac{r^3}{R^3} = 1 - \eta^3 \quad (2)$$

A valódi sűrűség ismeretében felírhatók a következő összefüggések, ahol ρ_g jelenti a gömbhéj sűrűségét, ρ_{lev} pedig a levegő sűrűségét ($\rho_{lev}=1,205 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, $\rho_{kerámia}=3,13 \text{ g/cm}^3$).

$$\rho_b = f\rho_g + (1-f)\rho_{lev} \quad (3)$$

$$\rho_g = (1-\eta^3)\rho_{kerámia} + (1-(1-\eta^3))\rho_{lev} \quad (4)$$

Ezen egyenletek ismeretében meghatározható minden erősítőanyag típushoz tartozó η érték:

	Globocer	SSI	SL300	SLG	SL150
η (-)	0,8316	0,9369	0,9274	0,9463	0,9191

2.táblázat: Mérésből számított η értékek.

A kapott η értékek alapján célszerű a mérési eredményeket két csoportra osztani, mivel SSI, SL300, SLG, SL150 erősítőanyagokra kapott eredmények elhanyagolható mértékben térnek el egymástól. Ennek megfelelően a becslések során a következő értékekkel számoltam:

$$\eta_{Globocer} = 0,8316 \quad (5)$$

$$\eta_{SL\text{átlag}} = \frac{\eta_{SL150} + \eta_{SL300} + \eta_{SSI} + \eta_{SLG}}{4} = 0,9324 \quad (6)$$

Az erősítőanyagok rugalmassági modulusának az alkotók értékeinek ismeretében és az összetétel arányának függvényében az egyszerű keverési szabállyal egységesen $E_{ea}=190 \text{ GPa}$, a Poisson-tényezőre $\nu_{ea}=0,2$ adódott.

A gömbhéjak külső átmérőit szintén mérésel határozták meg. Ezen eredményeket átlagoltam, így jutottam a Globocer erősítőanyagra jellemző $d_{\text{Globocer}} = 1,43 \text{ mm}$, illetve az SSI, SL300, SLG, SL150 gömbhéjakhoz tartozó $d_{\text{SLátlag}} = 0,16 \text{ mm}$ értékekhez. Az utóbbi esetben a különböző típusok átmérőinek átlagolása az elhanyagolható méretbeli különbség végett volt megengedhető. Ezek az értékek megfelelő pontossággal közelítik a valós adatokat, mivel Globocer erősítőanyag esetén 1082 darab mérési eredményből, SSI, SL300, SLG, SL150 erősítőanyagok esetén pedig összesen 6011 darab mérési eredményből születtek meg az átlagok.

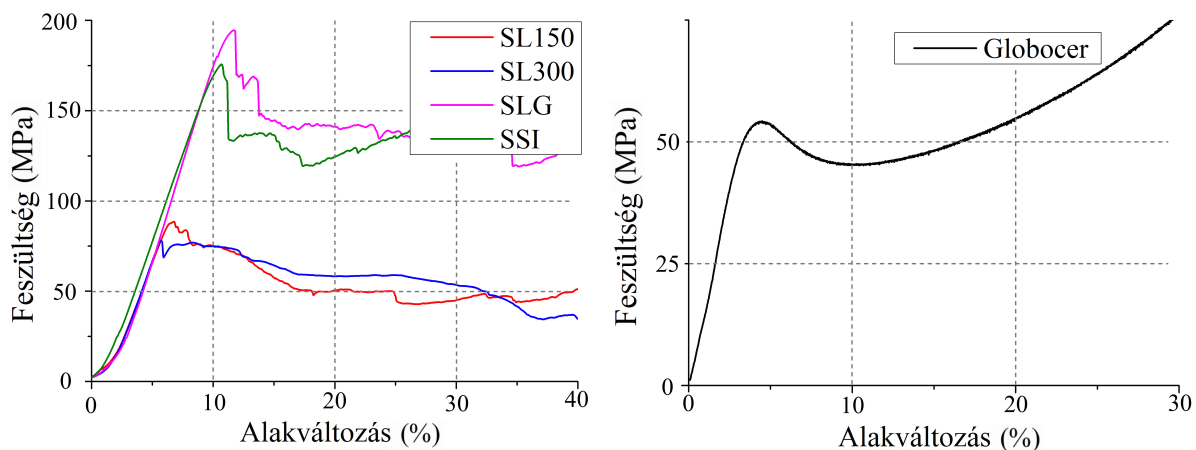
4.2. Mátrix jellemzői

Az erősítőanyagot körülvevő mátrixanyag minden esetben Al99,5, mely rugalmassági modulusza $E_m = 70 \text{ GPa}$, Poisson-tényezője $\nu_m = 0,33$ és sűrűsége $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$.

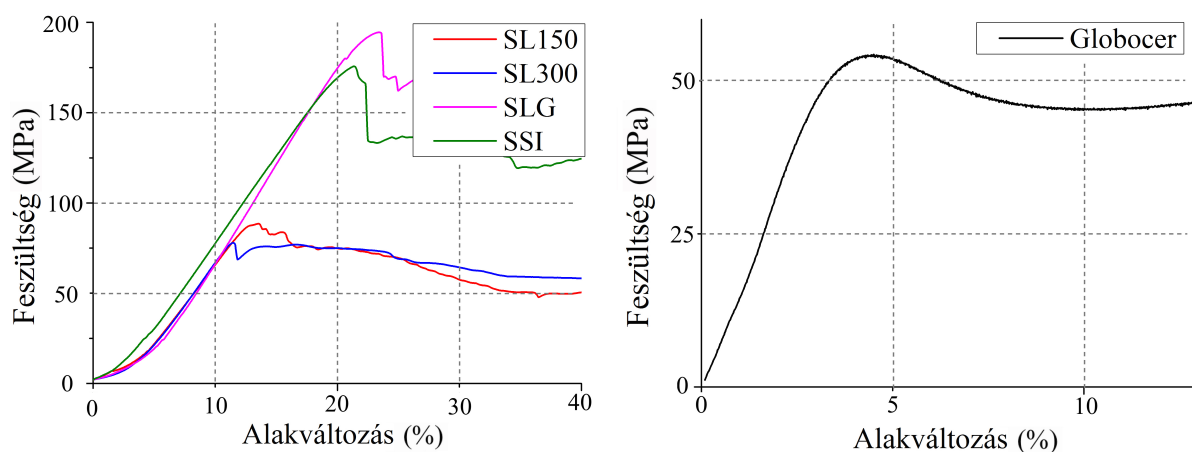
4.3. A vizsgált anyagok mért rugalmassági modulusza

A szintaktikus habok egyik legfontosabb tulajdonsága a mechanikai energiaelnyelés, leginkább jellemző mechanikai igénybevételük a nyomás. A legtöbb alkalmazás is erre épít és a nyomás során elnyelődő mechanikai energiára, ezért a fejlesztések során a legtöbb esetben az energiaelnyelés maximalására és a sűrűség minimalizálására törekednek. A nyomó igénybevétel fontossága miatt a leggyakrabban alkalmazott vizsgálati módszer is a nyomóvizsgálat. A próbatestek összenyomódása alatt elnyelt mechanikai energia a nyomóvizsgálat során rögzített adatokból előállított feszültség-alakváltozás diagram alatti területtel arányos [24].

Az egytengelyű nyomóvizsgálat szolgáltatja eredményekből, a feszültség és az alakváltozás értékeit felhasználva minden egyes erősítőanyag típushoz elkészítettem a nyomóvizsgálat görbét (22-23. ábra).



22. ábra: A egyes anyagok nyomóvizsgálataihoz tartozó feszültség-alakváltozás görbék.



23. ábra: A feszültség-alakváltozás görbék nagyított részlete a rugalmassági modulusok meghatározásához.

Az elkészített feszültség-alakváltozás görbék kezdeti, közel lineáris szakaszához érintőt húztam, és ezen egyenesnek a meredeksége segítségével meghatároztam az egyes anyagokra jellemző rugalmassági modulusokat. Az érintőket számítógépes program segítségével illesztettem. A kapott eredményeket a 3. táblázat szemlélteti.

	E (GPa)
Globocer	2,4083
SL150	2,8057
SL300	2,8940
SSI	2,6373
SLG	2,8487

3. táblázat: A mérésből származó rugalmassági modulusok

A későbbi vizsgálatok céljából ismét két csoportra osztottam a kapott rugalmassági moduluszokat:

$$E_{\text{Globocer}} = 2,4083 \text{ GPa} \quad (7)$$

$$E_{\text{SLátlag}} = \frac{E_{\text{SL150}} + E_{\text{SL300}} + E_{\text{SSI}} + E_{\text{SLG}}}{4} = 2,7964 \text{ GPa} \quad (8)$$

Célszerű volt az SL típusú erősítőanyagokat, az elhanyagolhatóan kis különbségek végett egy csoportként kezelni.

A rugalmassági moduluszok megfelelő pontossággal közelítik a valós értéket, mivel az eredményeket szolgáltató diagramokat minden erősítőanyag típus esetén 20 darab különálló mérésből készítettem el. Minden mérés esetén 0,01 mm-es elmozduláshoz tartozik egy alakváltozás és egy feszültség érték, ami (típustól függően) 3500-4000 regisztrált értéket jelent.

5. A homogenizációs modellek és eredményeik

A homogenizációs technikák lényege, hogy különböző geometriával és anyagi tulajdonságokkal rendelkező fázisokból álló kompozitnak meghatározza az eredő (homogénnek és izotrópnak tekinthető) rugalmassági tulajdonságait. Ahhoz, hogy egy anyag ezen tulajdonságait ismerjük, két egymástól független rugalmassági jellemző meghatározására van szükség. Ez a két érték esetemben a nyíró modulusz és a kompresszibilitási modulusz volt, melyekből a szilárdságtan szabályainak megfelelően származtatható a rugalmassági modulusz és a Poisson-tényező is a következő összefüggések segítségével:

$$E_h = \frac{9K_h G_h}{3K_h + G_h} \quad (9)$$

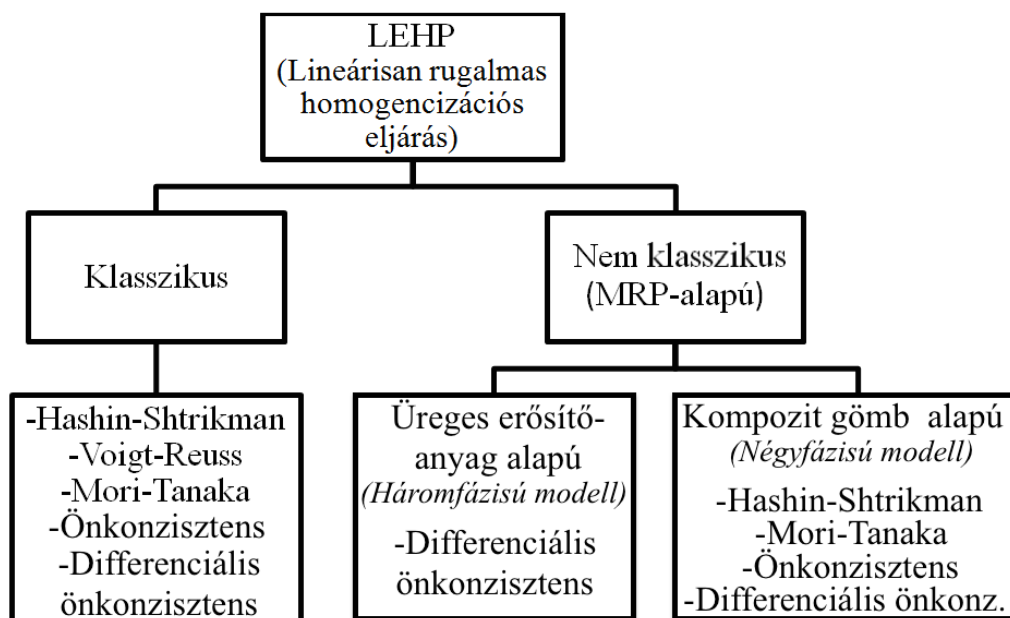
$$\nu_h = \frac{3K_h - 2G_h}{2(3K_h + G_h)} \quad (10)$$

5.1. A homogenizációs modellek csoportosítása

Első lépésben a rendelkezésre álló homogenizációs technikákat valamely logika mentén csoportosítani kellett eredményeik későbbi összehasonlíthatósága végett. A homogenizációs technikák rugalmasságtani megfontolások alapján két csoportba sorolhatók: klasszikus és nem klasszikus megközelítésűekre. A különbség a két csoport között az, hogy az

Eshelby probléma [7], melyre a klasszikus becslési módszerek épülnek, csupán állandó értékű alakváltozást tud kezelni az erősítőanyag fázisán. Ezzel ellentétben az utóbbi – MRP alapú becslések – [8] azon az Eshelby-szerű problémán alapszanak, mellyel képesek homogén fázisonként változó alakváltozás és feszültség kezelésére.

Ezt követően a nem klasszikus becslési módszereket további két szempont alapján csoportosítottam. A szeparáció alapja a fémhab modelleket felépítő, egységnyinek tekinthető „építőelemek” voltak. Alapvetően megkülönböztetünk három- és négyfázisú modelleket, melyek felépítését a 13. ábra szemlélteti [9]. Mindkét modell tartalmaz egy-egy gömbhéjat és az azt körülvevő homogén referencia közeget, viszont az utóbbi a kettő között még egy koncentrikus mátrixgyűrűvel is rendelkezik. Tehát ezen két egység alapján megkülönböztetünk nem klasszikus háromfázisú modellre épülő homogenizációs technikát, melyet üreges erősítőanyag modellnek is nevezünk (*Hollow Inclusion~HI*), illetve nem klasszikus négyfázisú modellre épülő technikát, más néven kompozit gömb modellt (*Composite Sphere~CS*). A csoportosítás strukturált szerkezete a 24. ábrán látható. A későbbiekben az itt megfogalmazott csoportosításnak megfelelően végeztem el az eredmények összehasonlítását, melyek alapján megállapítható az egyes modellek pontossága a különböző bemenő paraméterek mellett (például erősítőanyag tartalom, gömbhéj külső-belső átmérőjének aránya, egyes fázisok rugalmassági értékei, stb.).



24. ábra: A homogenizációs technikák csoportosítása.

5.2. A klasszikus homogenizációs technikák

A klasszikus homogenizációs technikákról általánosan elmondható, hogy egy referencia közegbe beágyazott ellipszoid alakú homogén erősítőanyag Eshelby problémáján alapszanak [7], melyben a külső végtelen közeg egy távoli nyomó igényvétellel terheljük. A klasszikus homogenizációs technikák esetén lokális és globális izotrópiát feltételezünk minden fázisban. A megoldás $\mathbb{S}$ - Eshelby tenzor, $\mathbb{L}_r$ merevségi mátrix, $\mathbb{M}$ –merevségi mátrix inverze, $\bar{\mathbb{A}}^{(r)}$ – átlagos alakváltozás lokalizációs tenzor és $\mathbb{T}^{(R,r)}$ negyedrendű tenzor segítségével származtatható (ahol r index jelenti a mátrixot (m), az erősítőanyagot (w) és a külső végtelen közeg (R)). A tenzoros, matematikai összefüggéseket hely hiányában nem részletezem.

5.2.1. A Hashin-Shtrikman-féle becslés

A Hashin-Shtrikman-féle becslés (HS) a klasszikus homogenizációs technikák csoportjába tartozik [9]. Ha a külső, végtelen közeg rugalmassági tulajdonságait 0-nak választjuk, megkapjuk a Hashin-Shtrikman-féle alsó határt [14], $\mathbb{L}_R = \mathbb{L}_w$ helyettesítéssel pedig a felső határ értékei származtathatók. Ez azt jelenti, hogy a külső közeg megfelelő rugalmassági értékeit az erősítőanyag értékeinek választom. A becsléshez tartozó egyenleteket „A” függelékben részleteztem. A kapott eredményeket a 4. ábra szemlélteti.

	E_{HS} (GPa)	G_{HS} (GPa)	ν_{HS} (-)
Globocer	58,23	23,09	0,26
SL átlag	35,81	14,02	0,28

4. táblázat: Hashin-Shtrikman-féle becslés eredményei.

5.2.2. A Mori-Tanaka-féle becslés

A Mori-Tanaka-féle becslés (MT) szintén a klasszikus homogenizációs technikák családjához tartozik [9]. A rugalmassági értékek származtatása hasonlóan történik a Hashin-Shtrikman-féle becsléshez. A különbség abban rejlik, hogy a felső határhoz tartozó értékeket $\mathbb{L}_R = \mathbb{L}_m$ helyettesítéssel kaptam meg. Tehát a külső közeg megfelelő rugalmassági értékeit a szintaktikus habban lévő mátrix értékeinek választottam. A becsléshez tartozó egyenletek az „A” függelékben szerepelnek. A modell eredményei az 5. táblázatban találhatók.

	E_{MT} (GPa)	G_{MT} (GPa)
Globocer	42,92	17,27
SL átlag	25,81	10,32

5. táblázat: Mori-Tanaka-féle becslés eredményei.

5.2.3. A Voigt-Reuss-féle becslés

A Voigt-Reuss-féle becslés (VR) az előző két modellhez hasonlóan a klasszikus homogenizációs technikák közé sorolandó [9]. A becslés felső határát „végtelen” merevséggel rendelkező külső közeg megválasztásával kapjuk, míg az alsó határ értékei az úgynevezett keverési szabály (*rule of mixtures*) alapján származtathatók. Ennek a módszernek a lényege, hogy az eredő rugalmassági tulajdonságokat a fémhabot alkotó elemek arányainak megfelelően számítja. A becslési módszer velejárója, hogy a számítások során a kompozitot alkotó anyagok Poisson-tényezőjét elhanyagolja. A becsléshez tartozó analitikus megoldás részleteit „A” függelékben, a modell eredményeit pedig a 6. táblázatban mutatom be.

	E_{VR} (GPa)	G_{VR} (GPa)
Globocer	77,93	31,00
SL átlag	48,92	19,07

6. táblázat: Voigt-Reuss-féle becslés eredményei.

5.2.4. Az önkonzisztens becslés

Az önkonzisztens becslés (SC) a klasszikus homogenizációs technikákhoz tartozik [3], [9]. A megoldás egy két ismeretlent tartalmazó, két egyenletből álló rendszer megoldásaként adódik. A két keresett érték a szintaktikus hab kompresszibilitási- és nyíró modulusza. Az eddigiekhez képest a fő különbség abban rejlik, hogy a végtelen közeg rugalmassági moduluszát a kompozit keresett, homogenizált rugalmassági moduluszával becsli, így a feladat implicitté válik. Az egyenletrendszer megoldásából nyolc darab értékpár adódik, melyekből csupán egy a számunkra releváns adat. Az eredmény kiválasztása során figyelembe kell venni, hogy a feltételezett gyöknek pozitívnak kell lennie, illetve mind a kompresszibilitási, mind a nyíró modulusz értékének kisebbnek kell lennie a mátrix és az erősítőanyag ide tartozó értékei közül a nagyobbiknál. A becsléshez tartozó egyenletek „A” függelékben szerepelnek. A modell eredményeit az 7. táblázatban foglaltam össze.

	E_{SC} (GPa)	G_{SC} (GPa)
Globocer	32,79	16,58
SL átlag	3,56	1,73

7. táblázat: Az önkonzisztens becslés eredményei.

5.2.5. A differenciális önkonzisztens becslés

A differenciális önkonzisztens becslés (DSC) szintén a klasszikus homogenizációs technikák családjához tartozik [9]. A becslési módszer kidolgozása Pal nevéhez fűződik [25], mely az Eshelby probléma iterációs megoldásán alapszik. Ez a folyamat kezdetben 0 tf% erősítőanyagot feltételez, azaz a mátrix rugalmassági értékeivel számolja az iteráció első eredményét, majd az erősítőanyag tartalmat lépésről lépésre növelve éri el a kompozit eredő rugalmassági tulajdonságait, azaz:

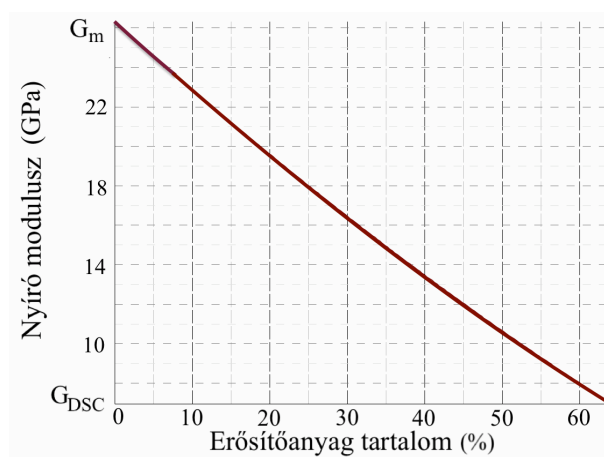
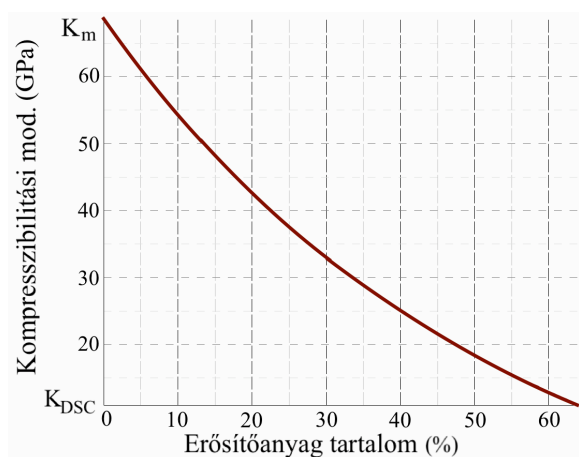
$$s \in (0, f) \text{ és } \mathbb{L}_0(s) \quad (11)$$

A megfelelő behelyettesítések egy tenzoros differenciálegyenlethez vezetnek, melyet deviátoros- és volumetrikus részre bontva kapjuk az eredő kompresszibilitási és nyíró moduluszokhoz tartozó differenciálegyenleteket. Az egyenleteket kielégítő megoldásfüggvények a bennük szereplő konstansok kitevőinek közel százas nagyságrendű különbsége miatt nem fejezhetők ki zárt formában. Ezen okból kifolyólag a probléma megoldásához egy numerikus megoldást választottam, pontosabban negyedrendű Runge-Kutta-módszert alkalmaztam a következő kezdeti érték feltétellel:

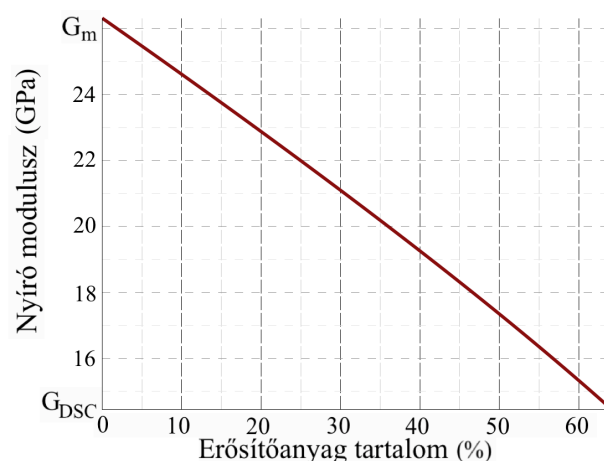
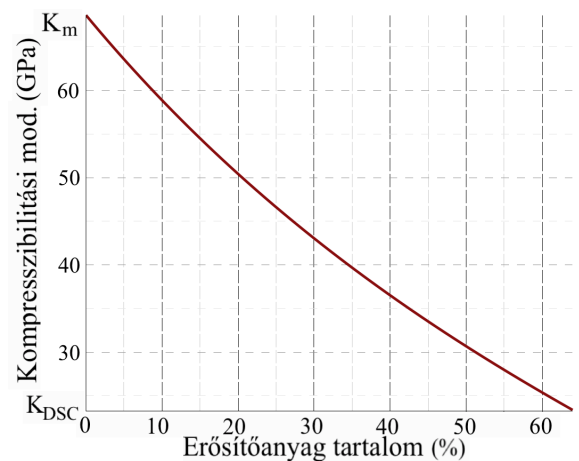
$$G_{DSC}(s = 0) = G_m \quad (12)$$

$$K_{DSC}(s = 0) = K_m \quad (13)$$

Tartalmilag ez azt jelenti, hogy $s = 0$ tf% erősítőanyag esetén az kompozit eredő kompresszibilitási és nyíró modulusza (azaz a rugalmassági modulusz is) megegyezik a mátrix ide tartozó értékeivel. A homogenizációs technika eredményeihez tartozó közelítő megoldás görbáját grafikonon is ábrázoltam, amin a fentiekben megfogalmazottak jól látszanak (25. és 26. ábra).



25. ábra: Az SL típusú erősítőanyagokhoz tartozó homogenizált kompresszibilitási moduluszt szolgáltató differenciálegyenlet görbéje.



26. ábra: A Globocer erősítőanyagokhoz tartozó homogenizált nyíró moduluszt szolgáltató differenciálegyenlet görbéje.

A differenciális önkonzisztens homogenizációs technika eredményeit—a kétféle erősítőanyag típus és a 64 t^o% erősítőanyag tartalom mellett— a 8. táblázatban foglaltam össze és „A” függelékben részleteztem.

	E_{DSC} (GPa)	G_{DSC} (GPa)
Globocer	36,01	14,48
SL átlag	17,35	7,00

8. táblázat: A differenciális önkonzisztens becslés eredményei.

5.3. A nem klasszikus homogenizációs technikák

5.3.1. Kompozit gömb alapú homogenizációs technikák

A kompozit gömb alapú homogenizációs technikák sajátos jellemzője, hogy a homogenizálandó szintaktikus habot négyfázisú egységekből (Morphologically Representative Pattern ~ MRP-kből), egy úgynevezett Kompozit Gömb Elrendezési módszer (Composite Sphere Assemblage ~ CSA [26]) segítségével felépülő modellel (Representative Volume Element ~ RVE-vel) közelíti [8]. A kompozit gömb alapú modellek gömbhéjból, mátrixból, végtelen közegből és a gömbhéj által közrezárt levegőből állnak, melyet más néven négyfázisú modellnek is nevezünk. Az általam vizsgált összes becslési módszernél az RVE-t felépítő MRP-k geometriája és rugalmassági tulajdonságai azonosak voltak. A rendszert felépítő egységek típusa alapján két különbözőt vizsgáltam: Globocer és átlagolt SL erősítőanyaggal rendelkező MRP. Ezen egységekre jellemző geometria és rugalmassági tulajdonságok a 4. fejezetben szerepelnek.

A kompozit gömb alapú becslések mindegyikére általánosan igaz, hogy a homogenizált kompresszibilitási modulusz – függetlenül a becslés típusától – azonos értékű [27], azaz:

$$K_0^{cs} = K_m \frac{\delta(1+f\gamma)+\kappa(1-f)\gamma}{\delta(1-f)+\kappa(\gamma+f)} \quad (14)$$

ahol

$$\gamma = \frac{4G_m}{3K_m} \quad (15)$$

$$\delta = \frac{4G_{ea}}{3K_m} (1 - \eta^3) \quad (16)$$

$$\kappa = \frac{4G_{ea}}{3K_{ea}} + \eta^3 \quad (17)$$

Ennek az az oka, hogy kompozit gömbhéjak külső felületén alkalmazott egységnyi nyomás és sugár irányú elmozdulás minden esetben ugyanazt a deformációs folyamatot eredményezi.

5.3.1.1. A kompozit gömb alapú Hashin-Shtrikman becslés

A kompozit gömb alapú Hashin-Shtrikman becslés (csHS) a nem klasszikus, kompozit gömb alapú homogenizációs technikák csoportjába tartozik [3], [9]. A becslés alapját képző MRP felépítése hasonló a 4.2.1.-es részben említett klasszikus Hashin-Shtrikman modelléhez, mivel a külső, végtelen közegre ebben az esetben is igaz, hogy $\mathbb{L}_R = \mathbb{L}_w$, ami a csHS felső határát eredményezi, míg az alsó határt egy 0 merevségű külső közeggel kaphatjuk meg. A

homogenizáció első lépése a kompresszibilitási modulusz meghatározása volt, melyet a 4.3.1.-ben leírtaknak megfelelően végeztem el. Ezt követően az eredő nyíró rugalmassági moduluszt határoztam meg az erősítőanyag belső felületén alkalmazott *szabad felületnek megfelelő peremfeltétel* és a különböző fázisok érintkező felületeire felírt *kompatibilitási egyenletek* segítségével. A homogenizációs módszer tesztelését a 3-as résznek megfelelően két különböző erősítőanyag típussal, $f=0,64$ erősítőanyag tartalom mellett végeztem el. Az így kapott eredményeket a 9. táblázatban foglaltam össze és „A” függelékben részleteztem.

	E_{csHS} (GPa)	G_{csHS} (GPa)
Globocer	55,54	22,02
SL átlag	33,51	13,38

9. táblázat: A kompozit gömb alapú Hashin-Shtrikman becslés eredményei.

5.3.1.2. A kompozit gömb alapú Mori-Tanaka becslés

A kompozit gömb alapú Hashin-Shtrikman becslés (csMT) a nem klasszikus, kompozit gömb alapú homogenizációs technikák közé sorolható [3], [9]. Az előző részben leírt párhuzam a klasszikus és nem klasszikus modell között a Mori-Tanaka becslésekre is igaz. Tehát a nem klasszikus esetben is az MRP-ben lévő külső, végtelen közeg merevségi mátrixát a befoglaló anyaggal azonosnak választottam ($\mathbb{L}_R = \mathbb{L}_m$). Ezen megkötés segítségével származtathatók a csMT becslés eredményei. A kompresszibilitási moduluszt a 5.3.1.-ben megfogalmazottak alapján határoztam meg. A másik független rugalmassági konstans (nyíró moduluszt) a belső felületet feszültségmentesnek feltételezve, és a megfelelő felületeken vett kompatibilitási egyenletek segítségével kaptam meg. A homogenizációs módszer vizsgálatát a 3. fejezetnek megfelelően két különböző erősítőanyag típussal, $f=0,64$ erősítőanyag tartalom mellett végeztem el. Az így kapott eredményeket a 10. táblázatban foglaltam össze és „A” függelékben részleteztem.

	E_{csMT} (GPa)	G_{csMT} (GPa)
Globocer	52,89	20,78
SL átlag	31,82	12,58

10. táblázat: A kompozit gömb alapú Mori-Tanaka becslés eredményei.

5.3.1.3. A kompozit gömb alapú önkonzisztens becslés

A kompozit gömb alapú önkonzisztens becslés (csSC) a nem klasszikus, kompozit gömb alapú homogenizációs technikák családjához tartozik [3], [9], melyet eredetileg Hervé és

Pellegrini dolgozta ki [4], majd Bardella és Genna fejlesztette tovább [3]. Az így kapott becslési technika explicit, analitikus megoldással szolgáltat egyféle MRP-ből felépülő szintaktikus hab rugalmassági tulajdonságait illetően. A kompresszibilitási modulus meghatározása, – hasonlóan az előző két részhez – a (9)-es egyenlet segítségével történik. A nyíró modulus meghatározása iteratív módon történik, mivel a kompozit gömb alapú önkonzisztens becslés esetén a külső közeg rugalmassági tulajdonságait a kompozit értékeinek választjuk, azaz: $\mathbb{L}_R = \mathbb{L}_0$. Élve azzal az egyszerűsítéssel, hogy a modellben szereplő minden erősítőanyag azonos η értékkel rendelkezik, a nyíró moduluszt egy másodfokú egyenlet szolgáltatja. Az egyenlet releváns gyökének ki kell elégítenie a következő feltételeket:

$$G_{csSC} > 0, \text{ illetve } G_{csSC} < \max(G_{ea}, G_m) \quad (18)$$

A kompozit gömb alapú önkonzisztens homogenizációs technika eredményeit – a kétféle erősítőanyag típushoz és a 64 tf% erősítőanyag tartalom esetén – a 11. táblázatban foglaltam össze és „A” függelékben részleteztem.

	E_{csSC} (GPa)	G_{csSC} (GPa)
Globocer	54,01	21,30
SL átlag	30,17	11,81

11. táblázat: A kompozit gömbhéj alapú önkonzisztens becslés eredményei.

5.3.2. Az üreges erősítőanyag alapú homogenizációs technikák

Az üreges erősítőanyag alapú homogenizációs technikák a 13-as ábrán látható háromfázisú modellre épülnek, melyben az erősítőanyag és a végtelen kiterjedésű közeg között nincs mátrixgyűrű. Tehát a szintaktikus habot közelítő RVE ezen háromfázisú MRP-kből épül fel [8]. Az általam vizsgált becslési módszer esetében minden MRP azonos tulajdonságú. Az erősítőanyagok típusát tekintve Globocer és átlagolt SL-t különböztettem meg, melyek tulajdonságait a 3. fejezetben foglaltam meg.

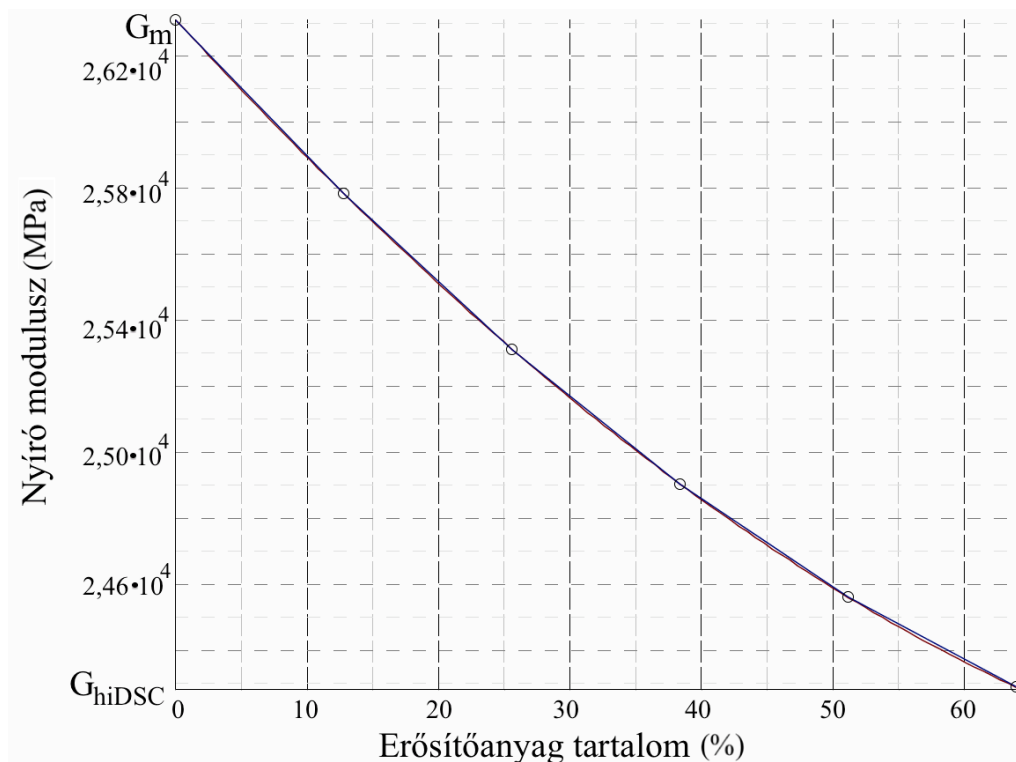
5.3.2.1. Az üreges erősítőanyag alapú differenciális önkonzisztens becslés

Az üreges erősítőanyag alapú technikák közül a differenciális önkonzisztens becsléssel foglalkoztam (hiDSC) [9], mely a nem klasszikus homogenizációs technikák csoportjába tartozik. Az eredeti becslési módszer kidolgozása Porfiri és Gupta nevéhez fűződik [28]. A megoldás két fő fázisból áll: Első lépésben a kompozitra jellemző nyíró

moduluszt kellett meghatároznom. A megoldást eredményező differenciálegyenlet ebben az esetben sem volt kifejezhető zárt alakban, ezért ismételten a negyedrendű Runge-Kutta-módszert használtam. A szükséges kezdeti érték feltételnek következőt választottam:

$$G_{hiDSC}(f = 0) = G_m \quad (19)$$

Ennek az a fizikai jelentése, hogy 0 tf% erősítőanyag esetén a „kompozit” nyíró modulusza egyenlő a mátrixéval. Ezen feltétel helyessége a 27. ábrán is megfigyelhető.

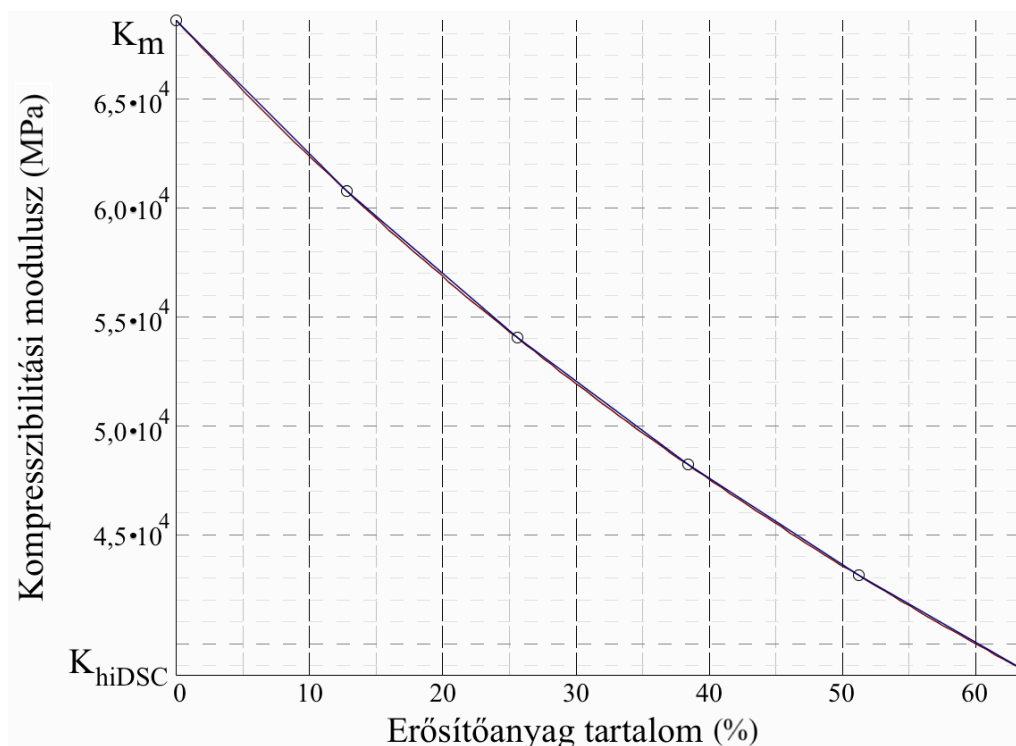


27. ábra: A Globocer és az SL erősítőanyagokhoz tartozó homogenizált nyíró moduluszt szolgáltató differenciálegyenlet görbéje.

A nyíró modulusz ismeretében számíthatóvá vált a homogenizált kompresszibilitási modulusz is. A megfelelő behelyettesítések elvégzése után ismét egy differenciálegyenletet kaptam, amit a nyíró moduluszhoz hasonlóan oldottam meg a következő kezdeti érték feltétellel:

$$K_{hiDSC}(f = 0) = K_m \quad (20)$$

A differenciálegyenlet numerikus megoldásához tartozó közelítő görbe a 28. ábrán látható.



28. ábra: A Globocer és az SL erősítőanyagokhoz tartozó homogenizált kompresszibilitási moduluszt szolgáltató differenciálegyenlet görbéje.

Ezt követően a két független rugalmassági konstans segítségével meghatároztam a szintaktikus fémhabra jellemző rugalmassági moduluszt és Poisson tényezőt. Az így kapott eredményeket a 12. táblázatban foglaltam össze és „A” függelékben részleteztem.

	E_{hiDSC} (GPa)	G_{hiDSC} (GPa)
Globocer	60,25	24,29
SL átlag	33,65	13,76

12. táblázat: Az üreges erősítőanyag alapú differenciális önkonzisztens becslés eredményei.

6. Eredmények összegzése, következtetések levonása

Munkám ezen fejezetében az irodalomban fellelhető, és előzőekben feldolgozott homogenizációs modellek eredményeit foglalom össze egy táblázatba, mely alapján összehasonlíthatók a kapott eredmények.

Globocer erősítőanyag				
		E (GPa)	G (GPa)	$E_{\text{mért}}$ (GPa)
Klasszikus	HS	58,23	23,09	2,41
	MT	42,92	17,27	
	VR	77,93	31,00	
	SC	32,79	16,58	
	DSC	36,01	14,48	
Nem klasszikus	csHS	55,54	22,02	
	csMT	52,89	20,78	
	csSC	54,01	21,30	
	hiDSC	60,25	24,29	

13. táblázat: A homogenizációs technikák- és a mérések eredményei Globocer erősítőanyag esetén.

Átlagolt SL erősítőanyag				
		E (GPa)	G (GPa)	$E_{\text{mért}}$ (GPa)
Klasszikus	HS	35,81	14,02	2,80
	MT	25,81	10,32	
	VR	48,92	19,07	
	SC	3,56	1,73	
	DSC	17,35	7,00	
Nem klasszikus	csHS	33,51	13,38	
	csMT	31,82	12,58	
	csSC	30,17	11,81	
	hiDSC	33,65	13,76	

14. táblázat: A homogenizációs technikák- és a mérések eredményei átlagolt SL erősítőanyag esetén.

A kísérleti- és becslések eredményeit összevetve egyértelműen látszik, hogy a homogenizációs technikák nagyságrendileg felülbecsülik a valós értékeket (egy kivétellel: az SL gömbhéjak esetén a klasszikus önkonzisztens módszer (zöld kiemelés) meglepően pontos eredményt szolgáltatott). A legpontosabb eredményt tehát az átlagolt SL erősítőanyag esetén a

klasszikus önkonzisztens becslés adta, viszont a Globocer gömbhéjak esetén ez sem minősíthető pontos eredménynek. A homogenizációs technikák eredményeit illetően megfigyelhető egy nagyságrendi egyezés, ami arra enged következtetni, hogy minden modell hasonló okból kifolyólag torzítja a valós eredményt.

6.1. A modellezett anyagok közti különbségek

Fontos ismételten kihangsúlyozni, hogy a fentiekben tárgyalt homogenizációs technikák polimer mátrixú kompozitok rugalmassági tulajdonságainak becslésére készültek. Ezzel ellentétben én alumínium (Al99,5) befoglaló anyag értékeivel számoltam. Ez azonban nagyságrendi különbségeket jelent a két mátrixtípus anyagi tulajdonságait illetően. Továbbá a szakirodalomban felhasznált erősítőanyagok átmérője és külső-belső sugarának aránya is eltérő. Ezen fő különbségeket a 15. táblázatban gyűjtöttem össze [3], [18]. Az erősen eltérő rugalmassági moduluszok mellett az átlagos méretben és falvastagág-arányban (η) is jelentős eltérés érzékelhető.

	Saját értékek		Szakirodalom			
Erősítőanyag típusa	Globocer	Átlagolt SL	K37 üveg gömbhéj	K37 üveg gömbhéj	H50 üveg gömbhéj	H50 üveg gömbhéj
Mátrix típusa	Al99,5	Al99,5	epoxi DGEBA	epoxi SP Ampreg 20 TM	epoxi	uretán
Gömbhéj külső átmérője (mm)	1,43	0,16	0,05	0,05	0,0004	0,0004
η (-)	0,8316	0,9324	0,9744	0,9744	0,85	0,85
E_m (GPa)	70	70	2,8	3,7	3,02	1,22
E_{ca} (GPa)	190	190	70,11	70,11	74	74

15. ábra: A különböző kompozitok tulajdonságainak összehasonlítása.

6.2. A homogenizációs technikák hiányosságai

Fontosnak tartom kiemelni, hogy a szakirodalomban fellelhető homogenizációs technikák nem számoltak a nemkívánatos porozitás jelenlétével, ahogy a mátrix és a gömbhéjak felülete között lévő tökéletlen adhézió hiányával sem. Tehát a vizsgált anyagmodellek több szempont szerint is idealizációkat tartalmaznak. Ebben a fejezetben összegyűjtöttem azokat – az eredeti becslési módszerekben nem szereplő – jelenségeket, tényezőket, melyek figyelembe vételével jobban megközelíthetők a szintaktikus fémhabok rugalmassági értékei.

A pontatlan eredmények főbb okai:

- A gyártásból eredő nemkívánatos porozitás.
- A gyártási folyamat során a gömbhéjak elhelyezkedése szabálytalan a mátrixon belül.
- A gyártási folyamat során az erősítőanyag és a mátrix felületén végbemenő kémiai reakció miatt bizonyos esetekben megváltozhat a gömbéj szerkezete, felületi minősége.
- A mátrix és az erősítőanyag érintkező felületén fellépő tökéletlen adhézió.

A homogenizációs eredmények pontatlansága indokoltá teszi – a fent felsorolt tényezők figyelembevételével – a meglévő modellek megfelelő átalakítását, amelyre vonatkozó javaslataimat és alapvető megfontolásait a következő fejezetben részletezek.

7. A homogenizációs technikák kiegészítése

Ebben a fejezetben bemutatom a munkám során kidolgozott két gondolatmenetet, melyek a 6. fejezetben említett hiányosságokat hivatottak kiküszöbölni. Első lépésben a homogenizációs technikák pontatlan becsléseinek lehetséges kiváltó okait két fizikai jelenség köré csoportosítottam. Az egyik ilyen jelenség a szintaktikus fémhab porozitásának és sűrűségének kérdése, a másik pedig a gyártás során lejátszódó kémiai reakció a gömbhéjak és a mátrix érintkezési felülete között.

Választásom azért esett erre a két problémakörre, mert ezen fizikai-kémiai tényezők befolyásoló hatásainak integrálásával külön-külön is sok olyan paramétert tudtam figyelembe venni, melyekkel közelebb kerültem a valós szintaktikus fémhab felépítéséhez.

7.1. A szintaktikus fémhabok porozítása, sűrűsége

A szintaktikus fémhabok valós sűrűségének problémája komplex fogalom, mivel a valós érték közelítéséhez sok tényezőt kell figyelembe venni. Ám fontos kiemelni, hogy ezen paraméterekkel történő kalkulálás során nemcsak a sűrűség, hanem közvetett módon az egyes fázisok rugalmassági tulajdonságai is módosulnak. Tehát a szintaktikus fémhabot felépítő fázisokon a sűrűségük és a fázisok egymáshoz viszonyított aránya szerint haladtam végig, és vizsgáltam ezen tényezők minden közvetlen és közvetett hatását.

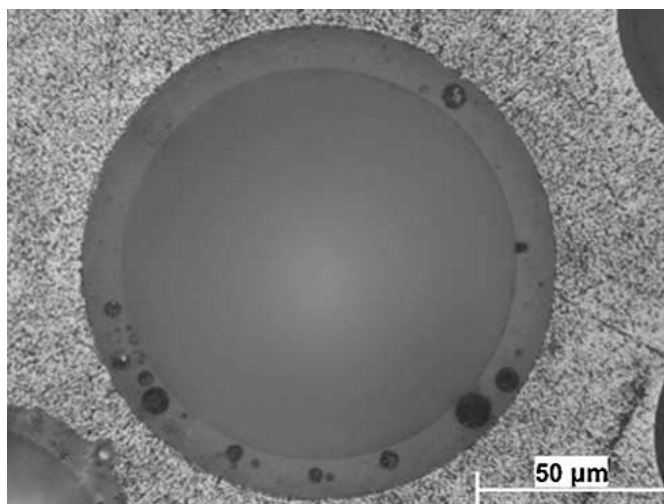
Célom az volt, hogy egy olyan leíró módszert alkossak a szintaktikus fémhabok sűrűségét illetően, amely a lehető legtöbb paramétert a lehető legpontosabb közelítéssel vesz figyelembe. Majd ezen módszer eredményei alapján alakítsam át az analitikus módszereket a pontosabb becslési eredmények elérése érdekében.

7.1.1. A szintaktikus fémhabok szerkezetének valós felépítése

A szintaktikus fémhabok valós felépítését jobban megközelítő leíró módszer létrehozásához első lépésben irodalomkutatást végeztem. Célom olyan kiegészítések keresése volt, amelyek a fenti modellekben nem szerepelnek, és felhasználásukkal valósághűbb képet és eredményt kapok mind a fémhabok sűrűsége, mind a homogenizált rugalmassági tulajdonságaikat illetően.

7.1.1.1. Az erősítőanyag porozításának szerepe

Az első ilyen tényező a gömbhéjak falának porózussága [29]. A 29. ábrán megfigyelhető lyukacsos szerkezet, mely az erősítőanyag gyártása során fellépő folyamatok miatt alakul ki. A szakirodalomban [29] és a gyártói honlapon [22] fellelhető adatok alapján átlagosnak mondható 20%-os falporozitás értékkel számoltam. Ez azt jelenti, hogy a gömbhéj falának ötöde nem tölti be erősítő funkcióját, belső üregek formájában inhomogénné teszi a gömbhéj falának szerkezetét. Belátható, hogy ezen porózusság komoly befolyásoló tényező a gömbhéj tulajdonságait illetően. Sűrűség szempontjából a valós erősítőanyagé kisebb lesz, mint a fenti homogenizációs technikák által használt tökéletesen tömör gömbhéjé. Ezen kívül az erősítőanyag terhelhetősége is egészen más a körbezárt üregek mentén, mint a tömör fal esetében, tehát a rugalmassági- és nyíró modulusz értékét is befolyásolja. Ez ismételten újabb különbséget jelent a fenti idealizációhoz képest.



29. ábra: Az SL300 típusú erősítőanyag falának porózus szerkezete.

Összegezve a porózus szerkezet miatt eszközölt változtatásokat, elmondható, hogy módosul a kompozit sűrűsége az eredeti értékhez képest. Ez a teljes leíró egyenlet részét képezi, ezért matematikailag megfogalmazott formában később ismertetem. Másrésről figyelembe véve az üregek szilárdságbeli hatását, a porózusság arányában változtattam a falvastagság-arány (η) értékét. Ezt az erősítőanyag típusokra jellemző eredeti átmérő ismeretében tudtam megvalósítani. A 18. és 19. egyenletek ennek menetét mutatják be.

$$V' = 0,8 \cdot V_{\text{eredeti}} \quad \text{és} \quad \eta = \frac{r}{R} \quad (21)$$

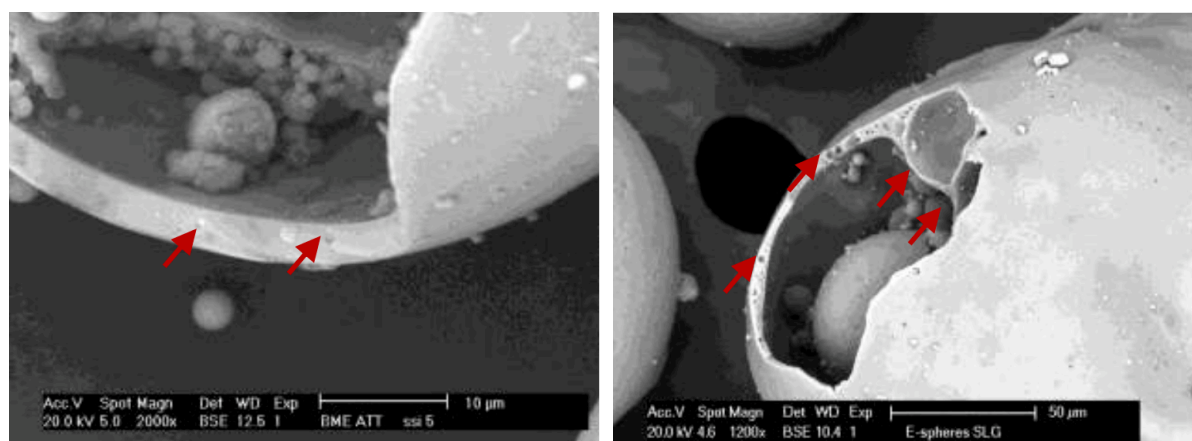
$$\eta'_{\text{Globocer}} = 0,8707 \quad \text{és} \quad \eta'_{\text{SLátlagok}} = 0,9467 \quad (22)$$

A térfogatok és a külső-belső sugarak ismeretében meghatároztam a porózus szerkezettel rendelkező gömbhéjra jellemző új η' értékeket. Továbbá módosítottam az erősítőanyag falára jellemző rugalmassági tulajdonságokat is. Ezt legegyszerűbb közelítésként a keverési szabálynak megfelelően tettem meg, tehát homogenizáltam a 80%-ban kerámia, 20%-ban levegő fázisokkal rendelkező anyag rugalmassági tulajdonságait.

A felsorolt módosításokat és az így kapott értékeket a további megfontolások eredményeivel együtt a 17. táblázatban (lásd később) foglaltam össze.

7.1.1.2. A törött gömbhéjak szerepe

A törött erősítőanyagok problémája elkerülhetetlen a szintaktikus fémhabok esetén. Jelenlétük a fémhabok gyártási folyamatával, a nyomásos infiltrálással kapcsolható össze. A technika lényege, hogy nagy hőmérsékleten (600-720 °C) a szükséges nyomás (350-450 kPa) segítségével a fémmátrixot bepréselik az erősítőanyag közé [29]. Ez a két mennyiség (hőmérséklet és nyomás) az infiltrálási idővel kiegészülve a gyártási folyamat három fő jellemzője, melyek részben a törött erősítőanyagokért is felelősek (30. ábra). A szakirodalom és a kísérletek alapján ennek értékét vizsgálataim során átlagosan 16%-nak választottam [24]. Ebben az esetben az erősítőanyag-mátrix fázisok arányainak változását kellett vizsgálnom. A törött gömbhéjak elvesztik erősítő- és energiaelnyelő hatásuk jelentős részét, belsejüket a mátrixanyag tölti ki. Ennek megfelelően valós esetben a mátrix aránya nagyobb lesz, míg az erősítőanyag mennyisége kevesebb.

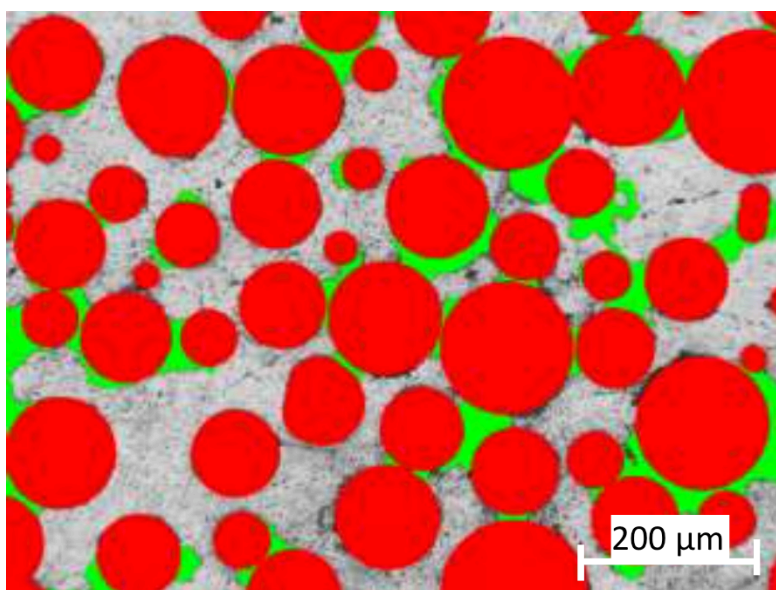


30. ábra: Törött Cenosphere (SSI) gömbhéj (bal), illetve törött Enviropheres (SLG) erősítőanyag (jobb) [24].

Tehát a törött gömbhéjak problémájából adódóan módosul a kompozit eredő sűrűsége az egyes fázisok arányainak megváltozása miatt. Ennek részleteit a teljes leíró egyenletnél (lásd később), illetve a módosításokat összefoglaló 32. ábrán mutatom be.

7.1.1.3. A mátrixban lévő (nemkívánt) porozitás

A porozitás a szintaktikus fémhabok egyik meghatározó tulajdonsága, mivel a jellemzően nyomó igénybevételnek kitett kompozitfajta tulajdonságait, illetve tönkremenetelének módját nagymértékben befolyásolja. A szintaktikus fémhabra jellemző eredő porozitás két tényező együttes jelenlétéből tevődik össze. Az egyik ilyen a gömbhéjak fala által körbezárt üreg, melynek értéke az η arányszám és a külső átmérő ismeretében meghatározható. Ennek köszönhető a szintaktikus fémhabok kis sűrűsége. A másik ilyen tényező a mátrixanyag elégtelen infiltrációjából adódó porozitás [24]. Ez gyakorlatilag a szintaktikus fémhabban lévő olyan (nemkívánt) üregek százalékos arányát jelenti, amelyek a mátrixban – az erősítőanyagok között – helyezkednek el. Az ilyen jellegű üregek a szintaktikus hab azon részein alakulnak ki, ahol nagyobb a lokális erősítőanyag koncentráció, a gömbhéjak egymáshoz közel helyezkednek el, a köztük lévő rés kicsi és az infiltrálási nyomás nem elegendő ahhoz, hogy a mátrixanyag az ilyen, szűk résekbe hatoljon (31. ábra). Ideális esetben a nemkívánt porozitás értéke zérus, valós esetben ettől eltér.



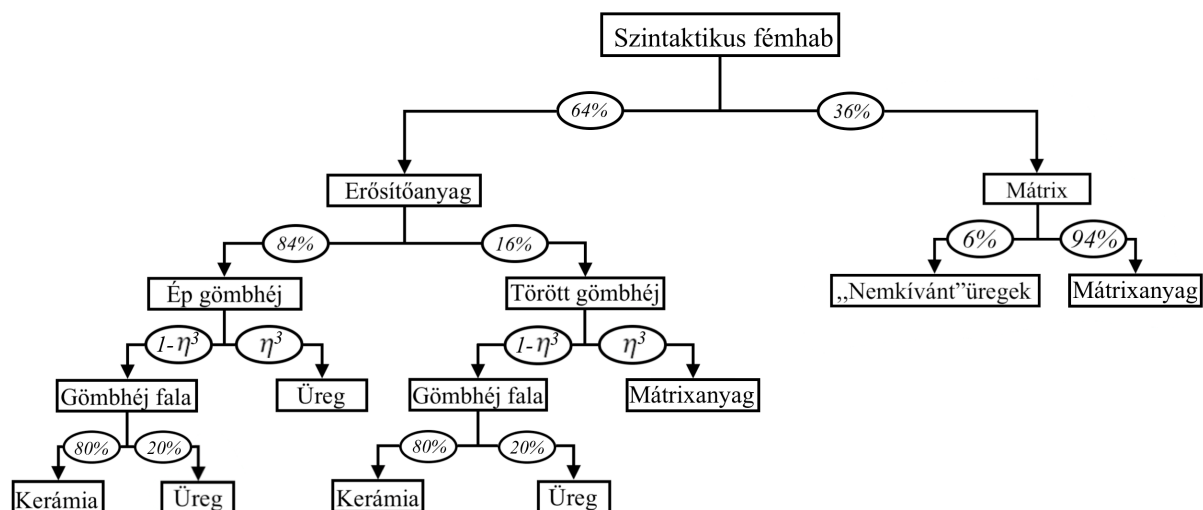
31. ábra: Az gömbhéjak (piros) körül kialakuló(nemkívánt) porozitás (zöld) [24].

Munkám során a kompozitot jellemző porozitás mindkét összetevőjét vizsgáltam. Az előbbi a 7.1.2. fejezetben szereplő, sűrűséget, illetve fázisarányokat leíró egyenletbe foglaltam bele. Viszont a mátrixban rendezetlenül elhelyezkedő üregek esetében szükséges volt a mátrix – ezáltal a kompozit – rugalmassági tulajdonságainak a módosítása is, mivel belátható, hogy a nemkívánt üregek jelenléte kedvezőtlen befolyással bír ezen tulajdonságokat illetően. Ezt a módosítást legegyszerűbb közelítésként ismét a keverési szabálynak megfelelően végeztem el, ami gyakorlatilag a mátrix és a nemkívánt üregek rugalmassági tulajdonságainak

homogenizációját jelenti. A számítások során a szakirodalomban fellelhető átlagos értékekkel dolgoztam, mely Globocer és SL típusú erősítőanyag esetén ~ 6-6% [24].

7.1.2. A szintaktikus fémhabok sűrűségének becslésére szolgáló módszer

Ebben a fejezetben bemutatom azt a módszert és matematikai megfogalmazását, amely képes a fentiekben megfogalmazott jelenségek függvényében a szintaktikus fémhabokra jellemző sűrűség értéket meghatározni [30]. Ezen egyenlet bemenő értékei a mátrixra jellemző (nemkívánt) porozitás, a gömbhéjak porózussága, a törött erősítőanyag mennyisége, az η arányszám, és az egyes fázisokat alkotó anyagok sűrűsége (például a kerámia gömbhéjak falában lévő Al_2O_3 stb. sűrűsége). A leíró módszer ezen értékek és az egyes fázisok arányainak ismeretében határozza meg a szintaktikus fémhabra jellemző eredő sűrűség értékét. Az egyenlet logikai felépítése és az egyes fázisok aránya a 32. ábrán látható.



32. ábra: A vizsgált fémhab típusra jellemző fázisok összetétele és százalékos aránya.

A leíró egyenletet tetszőleges típusú szintaktikus fémhabra lehet alkalmazni, mivel az összes olyan paraméter szabadon módosítható, mely befolyásolja a kompozit eredő sűrűségét. Vizsgálataim során – a korábbiaknak megfelelően – Globocer és átlagolt SL erősítőanyagokat vizsgáltam. A 7.1.1. fejezetben tárgyalt értékek mellett a következő eredményeket kaptam (16. táblázat):

	Mérés (g/cm ³)	Ideális becslés (g/cm ³)	Módosított becslés (g/cm ³)	Mérés- ideális becslés eltérés (%)	Mérés- módosított becslés eltérés (%)
Globocer	1,833	1,723	1,760	6	3,98
Átlagolt SL	1,470	1,352	1,448	8,03	1,50

16. táblázat: A mérési- és az analitikus leíró módszerek eredményeinek összehasonlítása.

Az így kapott eredményeket kísérleti (mért) értékekkel hasonlítottam össze [24]. Ezen sűrűségek egyrészt Archimedes törvénye alapján lettek megmérve, másrészt a fémhabok geometriájából és tömegéből is származtatható volt egy érték. A két mérési mód közül az előbbi szolgáltatja a pontosabb eredményeket, ezért az összehasonlítás alapját ezen értékek képezték. Ez alapján kijelenthető, hogy mérnöki értelemben megfelelően pontosak a leíró módszer sűrűségre vonatkozó becslései.

Összefoglalva a fenti fejezet eredményeit, kijelenthető, hogy a szintaktikus fémhabot alkotó fázisok jellemző tulajdonságainak és arányainak ismeretében a felépített egyenlet segítségével jobb pontossággal meghatározható a kompozit sűrűsége. Ez gyakorlatilag ellenőrzésként is szolgál a szintaktikus fémhab feltételezett szerkezetét illetően.

A leíró módszer a dolgozat átláthatósága és az egyenlet hossza végett az „B” függelékben található meg.

7.1.3. Az átalakított homogenizációs technikák eredményei

E fejezet célja, hogy bemutassam a meglévő homogenizációs technikákon elvégzett módosításokat, melyek az előző fejezetben ismertetett leíró egyenletből közvetlen (fázisok egymáshoz viszonyított aránya), és közvetett (η paraméter megváltozása) módon származtak. A modellek átalakítása során figyelembe kellett vennem egy új – nemkívánt üregekből álló – fázis ($f_{por.}$) megjelenését, melyre az eddigi modellek nem voltak képesek. Továbbá a kísérleti- és szakirodalmi eredményekre támaszkodva módosítottam a homogenizációs technikák releváns, bemenő értékeit. A kiindulási és az új értékek összehasonlítását a 17. táblázatban foglaltam össze.

	Eredeti értékek		Módosított értékek		Eltérés (%)	
	Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL
η (-)	0,8316	0,9324	0,8707	0,9467	4,69	1,53
f_{ea} (%)	64	64	50,11	52,13	21,70	18,55
f_m (%)	36	36	36,76	38,69	2,11	7,47
$f_{por.}$ (%)	0	0	13,13	9,18	13,13	9,18
E_{ea} (GPa)	190	190	152	152	20	20
E_m (GPa)	70	70	65,8	65,8	6	6

17. táblázat: A homogenizációs technikák eredeti és módosított értékei, illetve a különbség százalékos formában kifejezve.

A táblázatban látható eredmények megfelelnek a mögöttes fizikai tartalomnak. A funkciójukat betöltő gömbhéjak mennyisége csökkent (f_{ea}), – a törött gömbhéjak megjelenése miatt – ami a mátrix mennyiségének (f_m) növekedését is magával vonta. Továbbá $f_{por.}$ paraméterként megjelenik a nemkívánt porozitás fázis is. A táblázat értékeit alapul véve elvégeztem az átalakított homogenizációs technikák tesztelését, melynek eredményei a 18. táblázatban láthatók.

		$E_{eredeti}$ (GPa)		$E_{módosított}$ (GPa)		Eltérés (%)	
		Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL
Klasszikus	HS	58,23	35,81	40,73	29,96	30,05	16,09
	MT	42,92	25,81	31,70	23,26	26,14	9,90
	VR	77,93	48,92	50,80	37,89	34,81	22,55
	SC	32,79	3,56	48,44	12,36	47,73	247,2
	DSC	36,01	17,35	25,50	14,19	29,19	18,21
Nem klasszikus	csHS	55,54	33,51	38,46	27,64	30,75	17,52
	csMT	52,89	31,82	37,37	26,49	29,34	16,72
	csSC	54,01	30,17	43,27	28,68	19,88	4,94
	hiDSC	60,25	33,65	45,95	29,42	23,73	12,57

18. táblázat: A 7.1.1. fejezetben megfogalmazott változtatásokkal kapott eredmények és az eredeti modellek értékeinek összehasonlítása.

Az eredeti és az új értékek viszonyáról elmondható, hogy a Globocer típusú erősítőanyaggal rendelkező fémhab rugalmassági tulajdonságai nagyobb – átlagosan 29,24% – mértékben változtak és a mértékhez közelebb kerültek. Ennek az az oka, hogy a Globocer gömbhéjak falvastagsága lényegesen nagyobb, mint a SL típusú erősítőanyagoké. Ez azt

jelenti, hogy a porózusság– azonos arány mellett is – sokkal intenzívebben befolyásolja annak rugalmassági tulajdonságait. Továbbá megfigyelhető, hogy a módosított klasszikus Voigt-Reuss-féle becslés rendelkezik a legnagyobb eltéréssel az eredeti idealizált modellekhez képest. Ez azzal magyarázható, hogy a homogenizációs technikák közül a módosíthatatlan klasszikus Voigt-Reuss szolgáltatja a legpontosabb eredményt, mivel az egyes fázisok egymáshoz viszonyított arányán, a rugalmassági tulajdonságaikon kívül minden mászt elhanyagol. Tehát ezen paraméterek megváltozására érzékenyebben reagál, mint a többi modell.

Fontos kitérni a klasszikus önkonzisztens becslés „fordított” viselkedésére. Látható, hogy a többi modellel ellentétben itt az értékek nőttek az eredetiekhez képest. Ez valószínűsíthetően azzal magyarázható, hogy a homogenizációs technika eredetileg polimer mátrixszal rendelkező habokat vizsgált, melyek tulajdonságai lényegesen kisebbek, mint az Al99,5 mátrixé.

Végül fontos megemlíteni a módosított homogenizációs technikák változtatásaival kapcsolatos hiányosságokat. Nagy előrelépésnek számít, hogy a modellben megjelennek olyan valóságot tükröző paraméterek, mint a porózusság vagy a mátrix porozitása. Ám az új technikák csupán ezen jelenségek (becsült) mértékével képesek számolni, valós elhelyezkedésükkel, koncentrációjukkal nem. A jövőben érdekes feladat lehet ennek a problémának a megoldása.

7.2. Az érintkezési felületeken lejátszódó kémiai reakció

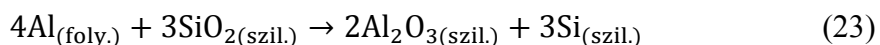
A gyártás során fellépő – a gömbhéjak és a mátrixanyag közös érintkezési felületein lejátszódó – kémiai folyamat a szintaktikus fémhabok valós szerkezetének egy más irányú megközelítése, mely a 7.1. fejezetben tárgyalt porozitás és sűrűség-problémával egyidejűleg fellépő jelenség.

7.2.1. A kémiai reakció bemutatása, következményei

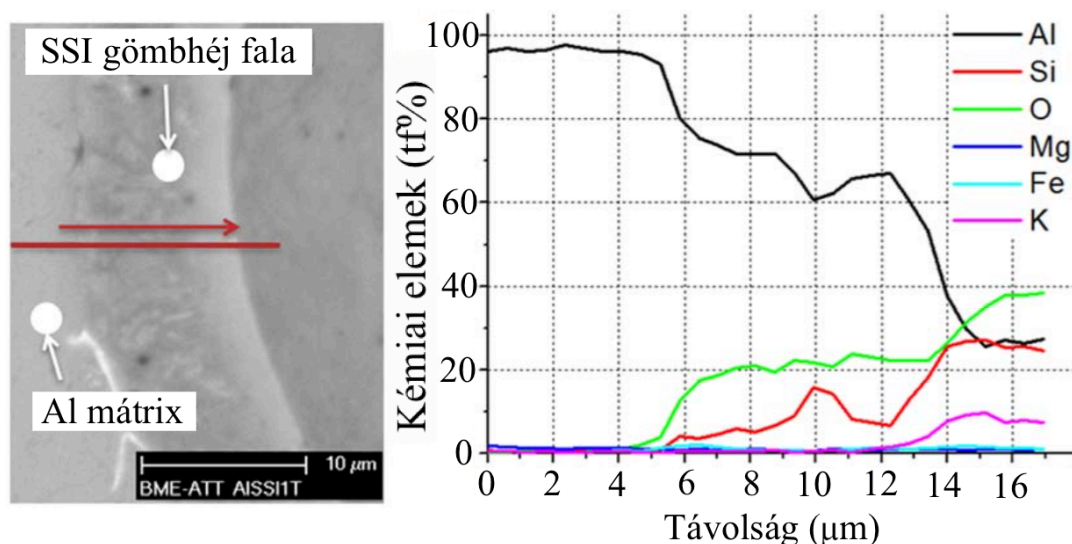
A szintaktikus fémhabok gyártására két módszer terjedt el: a keverékes eljárás és a nyomásos infiltráció. Az utóbbit nagy erősítőanyag tartalom esetén alkalmazzák, tehát számomra ez a releváns gyártási módszer.

A nyomásos infiltráció során külső nyomást alkalmaznak (rendszerint valamilyen inert gázt), melynek segítségével a mátrixanyagot a gömbhéjak közé préselik. Az eljárás három fő paraméterrel rendelkezik, amelyek az infiltrálási hőmérséklet, idő és nyomás. A gyártási folyamat során ezen jellemzők értéke – a megmunkálandó anyagoktól függően – 600-720 °C, <30 s, illetve 350-450 kPa tartományban változik [29]. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy nagyobb hőmérséklet, hosszabb infiltrálási idő és nagyobb nyomás mellett az érintkezési felületeken lejátszódó reakció intenzívebben megy végbe [24].

A kémiai folyamat lényege, hogy a mátrixanyag olvadt állapotban rendkívül reakcióképes, melynek következtében a kerámia gömbhéjakban lévő oxidokkal reagál és egy diffúziós cserereakció játszódik le. A reakció milyensége az egyes fázisokban lévő alkotóelemektől függ (4. fejezet). Ennek megfelelően az Al99,5 mátrixú és Globocer, illetve SL típusú erősítőanyagú fémhab gyártás során lejátszódó csere reakciót a következő sztöchiometriai egyenlettel lehet leírni:



A reakció a mátrix és az erősítőanyag között lévő szilícium koncentrációkülönbséget igyekszik kiegyenlíteni, ami diffúziós folyamaton keresztül megy végbe. A reakció során a – mátrix anyagát képző – folyékony halmazállapotú alumíniumból és a kerámiában lévő szilícium-oxidból, alumínium-oxid és szilícium keletkezik. Az így keletkező alumínium-oxid a gömbháj külső felületén válik ki. Ez önmagában előnyös lenne, mivel szilárdsági szempontból kedvező hatású, de az erősítőanyagból kiváló szilícium-oxid miatt a folyamat kedvezőtlennek bizonyul, a gömbháj fala károsodik [31]. Eredményként egy átmeneti zóna jön létre a mátrix és a gömbhéjak között, amelyben található elemek meghatározását vonalmenti energiadiszperzív röntgenspektrometriás méréssel végezték. Ez a technika egy adott tartományon belül grafikonon ábrázolja az ott lévő elemek koncentrációjának megváltozását. A 33. ábrán látható, hogy a gömbhéjtól távolodva növekszik az alumínium mennyisége, illetve csökken az oxigén, illetve szilícium koncentrációja. Az átmeneti zónában azonban nem egy éles összetétel változás tapasztalható, hanem egy közelítőleg 3 µm-es réteg, amelyben a fent említett koncentrációváltozás lezajlik [30]. A keletkezett réteg vastagsága arányos a redukált és újonnan képződött anyag mennyiségével.



33. ábra: Alumínium mátrixszal és SSI gömbhéjjal rendelkező fémhab BSE felvétele a vonalmenti EDS mérés helyéről (bal oldal) és a mért elemeloszlás spektrumok (jobbra) [31].

A 33. ábrán látható továbbá, hogy az átmeneti zóna kialakulása során bekövetkező anyagkiválás a gömbhéj külső felületét károsította. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a sérült felület kialakulása a nagy infiltrációs hőmérséklettel, a gömbhéj külső felületének nagyságával és az összetevők Si koncentráció különbségével magyarázható.

7.2.2. A kémiai reakció rugalmassági tulajdonságokra vonatkozó hatásai

Ezen fejezet célja az, hogy a szintaktikus fémhab gyártása során lejátszódó kémiai reakciót aszerint vizsgálja, hogy a rugalmassági tulajdonságokat illetően milyen közvetlen vagy közvetett hatása van. Ezek alapján két olyan jelenséggel foglalkoztam, melyek befolyásoló hatással bírnak. Egyik az anyagkiválás a gömbhéj falából, míg a másik az erősítőanyag külső felületének sérülése.

7.2.2.1. Anyagkiválás a gömbhéj falából

A csere reakciósorán a gömbhéj falának szilícium-dioxid tartalma lép reakcióba a folyékony halmazállapotú alumíniummal (23). A folyamat fontos velejárója, hogy a létrejövő anyagokból egy átmeneti zóna alakul ki, melynek vastagsága SL típusú erősítőanyagoknál $\sim 3 \mu\text{m}$ [30]. Az újonnan létrejövő külső héj viszont nem rendelkezik ugyanazzal az erősítő hatással, mint a gömbhéj. Ez gyakorlatilag az erősítőanyag falvastagságának csökkenéseként fogható fel. Ennek megfelelően az analitikus becslési módszerekben is ezt valósítottam meg,

melyet η paraméter megfelelő változtatásával értem el. Az erősítőanyagokra jellemző eredeti értékből és külső átmérőből kiindulva ez a következőképp alakult:

$$\eta'_{\text{Globocer}} = 0,8640 \quad (24)$$

$$\eta'_{\text{SLátlagok}} = 0,9687 \quad (25)$$

7.2.2.2. A gömbhéj külső felületének sérülése

A gömbhéj külső fala és a mátrix anyaga között lejátszódó kémiai reakció során a gömbhéj falából kioldott anyag roncsozja az erősítőanyag felületét [29], [31]. A sérült határfelülettel rendelkező gömbhéj rugalmassági tulajdonságai ennek következtében csökkennek. Ezt a különböző nyomóvizsgálatok eredményei is alátámasztják, melyek során a tönkremenetel már kisebb nyomófeszültségek esetén is bekövetkezett [24]. Sajnos nem állt rendelkezésre megfelelő mennyiségű adat (és idő) ahhoz, hogy a sérült erősítőanyagok mennyisége, minősége és a tönkremenetel bekövetkezéséhez tartozó feszültségek között függvényyszerű kapcsolatot hozzak létre.

A valóságos szintaktikus habok szerkezetét közelítő technikák létrehozásánál az elsődleges szempont az volt, hogy olyan értékek, mérések alapján dolgozzak, melyekből helyes következtetéseket vonhatok le. Ahhoz, hogy ezt jelen probléma esetén is hasonlóan végezhessem, további mérésekre lenne szükség.

7.2.3. Az átalakított homogenizációs technikák eredményei

Ennek a fejezetnek a célja, hogy bemutassam a meglévő homogenizációs technikákon elvégzett módosításokat. A változtatások lényege az volt, hogy a becslési módszerek a cserereakció során kialakuló átmeneti zóna jelenlétével is tudjanak kalkulálni, melyet η paraméter 7.2.2.1. fejezetben leírtak alapján történő módosításával értem el. A homogenizációs technikák η bemenő értékét a kísérleti- és szakirodalmi eredményekre támaszkodva módosítottam. Az átalakított homogenizációs technikák eredményei a 20. táblázatban láthatók.

		E _{eredeti} (GPa)		E _{módosított} (GPa)		Eltérés (%)	
		Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL
Klasszikus	HS	58,23	35,81	51,13	27,55	12,19	23,07
	MT	42,92	25,81	37,25	20,09	13,21	22,16
	VR	77,93	48,92	69,35	36,67	11,01	25,04
	SC	32,79	3,56	20,09	810,06	38,73	22654
	DSC	36,01	17,35	29,32	12,43	18,58	28,36
Nem klasszikus	csHS	55,54	33,51	48,75	24,59	12,23	26,62
	csMT	52,89	31,82	46,30	23,40	12,46	26,46
	csSC	54,01	30,17	46,62	20,92	13,68	30,66
	hiDSC	60,25	33,65	52,60	21,20	12,70	36,99

20. táblázat: Az átalakított homogenizációs technikák eredményeinek és az eredeti modellek értékeinek összehasonlítása.

Az eredeti és az új értékek összehasonlítása alapján elmondható, hogy az SL típusú erősítőanyaggal rendelkező fémhab rugalmassági tulajdonságai nagyobb – átlagosan 27,42% – mértékben változtak. Ennek az az oka, hogy a felület, melyen a csere reakció során a diffúzió lezajlott, az SL típusú gömbhéjaknál (nagyobb fajlagos felületük miatt) lényegesen nagyobb (21. táblázat).

	Globocer	Átlagolt SL
Felület-térfogat arány	9,87	197,99

21. táblázat: A gömbhéjak felület-térfogat aránya, mely annál nagyobb, minél kisebb az erősítőanyag átmérője.

A reakcióban résztvevő felületek nagysága 64 tf% erősítőanyag tartalom mellett a következők szerint alakulnak (feltételeztem, hogy a gömbhéjak sérülésmentesek, továbbá a számításokat olyan feltételezett kompoziton végeztem el, melyben az erősítőanyag falának össztérfogata 64 mm³):

$$A_{\text{Globocer}} = 631,48 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

$$A_{\text{SLátlagok}} = 12671,6 \text{ mm}^2 \quad (27)$$

Ez maga után vonja, hogy a– gömbhéj falából és a mátrix anyagából keletkezett –átmeneti zónák össztérfogata is nagyobb, hiszen nagyobb a reakcióhoz rendelkezésre álló felület:

$$V_{\text{Globocer}}^{\text{zóna}} = 16,3 \text{ mm}^3 \quad (28)$$

$$V_{SL}^{zóna} = 36,6 \text{ mm}^3 \quad (29)$$

A fentiek alapján belátható, hogy az SL típusú erősítőanyagok esetén a kémiai reakció nagyobb mértékben csökkenti a szintaktikus fémhab eredő rugalmassági tulajdonságait.

Továbbá fontos kitérni a klasszikus önkonzisztens becslés pontatlan értékeire, melynek eredményei a 7.1.3. fejezetben említett indokok alapján itt sem megbízhatóak.

7.3. A homogenizációs technikákon végzett módosítások összefoglalása

Az előző fejezetekben tárgyalt és két fő fizikai jelenség köré csoportosított, külön-külön vizsgált módosító tényezők (a 7.1. és 7.2. fejezetben leírtak) hatását indokolt összevonni és együttesen vizsgálni. Ennek megfelelően elkészítettem az összes módosítást tartalmazó homogenizációs technikák új változatát („A” függelék). Az eredeti- és a valamennyi változtatást tartalmazó bemenő értékeket a 21. táblázatban foglaltam össze.

	Eredeti értékek		Módosított értékek		Eltérés (%)	
	Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL	Globocer	Átlagolt SL
η (-)	0,8316	0,9324	0,9082	0,9842	9,21	5,56
f_{ea} (%)	64	64	50,11	52,13	21,70	18,55
f_m (%)	36	36	36,76	38,69	2,11	7,47
$f_{por.}$ (%)	0	0	13,13	9,18	13,13	9,18
E_{ea} (GPa)	190	190	152	152	20	20
E_m (GPa)	70	70	65,8	65,8	6	6

21. táblázat: A homogenizációs technikák eredeti és módosított értékei, illetve a különbség százalékos formában kifejezve.

Az összehasonító táblázat értékeiről elmondható, hogy az idealizált állapothoz képest legnagyobb változás az erősítőanyag tartalmában következett be. Ez a törött gömbhéjak és a szivacsos szerkezet figyelembevételével magyarázható. Ezzel összhangban a kompozit mátrix tartalma növekedett, hiszen a törött erősítőanyagok belsejét szintén mátrix tölti ki. Továbbá az átalakított modell képes figyelembe venni a mátrixban megjelenő porozitást is. Az erősítőanyag külső-belső sugarának hányadosa szintén módosult, a felületeken lejátszódó kémiai reakció és a szivacsos szerkezet miatt. A vizsgált jelenségek közvetlen hatása továbbá, hogy a gömbhéjak szivacsos szerkezetéből adódó egyenetlen terhelhetőség miatt csökkent a rugalmassági moduluszuk. A mátrixban megjelenő porozitás ugyanilyen hatással volt a mátrix rugalmassági tulajdonságaira. A valós állapotot közelítő módosításokat tartalmazó homogenizációs technikák eredményei a 22. táblázatban láthatók.

		E_{eredeti} (GPa)		$E_{\text{módosított}}$ (GPa)		Eltérés (%)		$E_{\text{kísérleti}}$ (GPa)	
		Glob.	Átlagolt SL	Glob.	Átlagolt SL	Glob.	Átlagolt SL	Glob.	Átlagolt SL
Klasszikus	HS	58,23	35,81	35,56	24,26	38,93	32,25	2,41	2,80
	MT	42,92	25,81	27,57	19,01	35,76	26,35		
	VR	77,93	48,92	44,87	30,10	42,42	38,47		
	SC	32,79	3,56	29,53	Hiba	9,94	Hiba		
	DSC	36,01	17,35	19,49	9,97	45,88	41,84		
Nem klasszikus	csHS	55,54	33,51	33,41	21,19	39,89	36,77		
	csMT	52,89	31,82	32,24	20,18	39,04	36,58		
	csSC	54,01	30,17	36,38	20,51	32,64	32,02		
	hiDSC	60,25	33,65	38,03	19,32	36,88	42,59		

22. táblázat: A valós állapotot közelítő módosításokat tartalmazó homogenizációs technikák eredményeinek és az eredeti modellek értékeinek összehasonlítása.

Az eredeti és a valós állapotot közelítő módosításokat tartalmazó homogenizációs technikák összehasonlítása alapján elmondható, hogy a Globocer és az átlagolt SL típusú erősítőanyagokhoz tartozó becslési eredmények hasonló mértékben csökkentek. Ez a Globocer gömbhéjaknál átlagosan 38,93%, míg átlagolt SL esetben pedig 36,86%. A legnagyobb Globocer erősítőanyaghoz tartozó csökkenés a klasszikus differenciális önkonzisztens becslés esetén figyelhető meg. Az átlagolt SL gömbhéjak esetében ezt a nem klasszikus üreges erősítőanyag alapú differenciális önkonzisztens becslés eredményezte. A kísérletekből származó eredményekhez viszonyított legpontosabb értékkel a klasszikus differenciális önkonzisztens becslés rendelkezik.

A klasszikus önkonzisztens technikáról elmondható, hogy az átalakítások ellenére a becslési eredmények nem mutatják – a többi modellel ellentétben – azt az elvárható tendenciát, melyet az idealizált modell elhagyásával és a valós szerkezet közelítésével tükröznie kellene. Továbbá a becslési technika az átlagolt SL esetben negatív értéket adott, mely egyértelműen hibás. Ennek alapján kijelenthető, hogy a pontosabb becslési eredmények érdekében a modell további átalakításokra szorul.

Eddigi munkám összefoglalásaként elmondható, hogy sikerült egy olyan úton elindulva csökkenteni és a valóságban mértékhez közelíteni a homogenizációs technikák eredményeit, amelynek végén képesek a becslési technikák a valós szintaktikus fémhab szerkezete alapján pontosabb, de még mindig nem megfelelően pontos értékeket szolgáltatni. A végrehajtott módosításokat megalapozott és megbízható értékek alapján végeztem el, mely

eredményeként sikeresen csökkentettem közel negyven százalékkal a becslések értékeit. Ám fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy ezen technikák még nem elég kifinomultak ahhoz, hogy a becsléseikkel kellő pontossággal megközelítsék a szintaktikus fémhabok valós rugalmassági tulajdonságait. A következő fejezetben összefoglalom azokat a még meg nem valósított módosításokat, amelyek segítségével még közelebb kerülhetünk a valós értékekhez.

8. Nyitott kérdések megfogalmazása

A homogenizációs technikák becsléseinek megfelelő pontossága érdekében a jövőben további módosítások elvégzése szükséges. Ebben a fejezetben megfogalmazok négy olyan jelenséget, melyek figyelembevétele, és az analitikus modellekbe történő átültetése megoldást adhat ezen problémára.

8.1. A véletlenszerű elhelyezkedés kezelése

Fontos probléma a szintaktikus fémhab valós felépítését közelítő jelenségek véletlenszerű elhelyezkedése az adott fázisokban. Ilyen jelenség például a nemkívánatos üregek a gömbhéjak falában. A véletlenszerű elhelyezéssel megközelíthetjük az egyes fázisok lokális anizotrópiáját, mely véleményem szerint nagy előrelépés lenne a szintaktikus fémhabok valós rugalmassági tulajdonságainak eléréséhez.

8.2. Különböző méretű és tulajdonságú erősítőanyagok jelenléte a kompozitban

A különböző méretű és tulajdonságú gömbhéjak jelenléte a szintaktikus habokban valós probléma, hiszen a gyártók által közölt adatok csupán névleges értékek, melyek körül mindig van valamilyen mértékű szóródás. Könnyen belátható, hogy nem létezik két egyforma porozitással, η paraméterrel vagy geometriával rendelkező gömbhéj. Ennek modellezésére alkalmas lehet ez a technika, hiszen minden ilyen paraméter gömbhéjanként változtatható. A nem klasszikus becslési technikákhoz tartozó, N darab különböző erősítőanyagot kezelni tudó modellek már részben elkészültek, de a téma bonyolultsága és hosszúsága miatt ezek bemutatása és alkalmazása nem fért bele a munkámba.

8.3. A tökéletlen adhézió a hátfelületeken

Az irodalomban fellelhető technikák közül csupán Marur foglalkozik a határfelületeken lévő adhézió minőségével [18]. A 7.2. fejezetben tárgyalt cserereakciót követő módosulás jelentős mértékben befolyásolja a felületek között ébredő kapcsolat erősségét. Az alumínium-oxid a gömbhéj külső felületén, tüskés formában válik ki [24], melynek az adhéziót tekintve pozitív hatásai lehetnek. A cserereakcióval járó gömbhéj degradáció viszont csökkenti a felületek közötti adhézió jóságát. Ezen jelenségek figyelembe vétele egy adhéziós réteg létrehozásával lehetséges, melyet a mátrix és a gömbhéj külső felülete közé kell elhelyezni. Marur munkájának nyomán elindulva már megkezdtem ennek a rétegnek a homogenizációs technikákban történő kialakítását.

8.4. A gömbhéjak külső felületének degradációja

A 7.2.2.2. fejezetben leírtak alapján a sérült gömbhéjak csökkentő hatásának mértéke még tisztázatlan a szintaktikus habok rugalmassági tulajdonságait illetően. Ezen összefüggés pontos meghatározásához további kísérletek szükségesek, ahol felállítható egy függvényszerű kapcsolat a sérült gömbhéjak mennyisége, minősége és tönkremenetelük között. Ezen technikák alapos kidolgozását jövőbeli feladatommak tekintem, melynek eredménye várhatóan a szintaktikus fémhabok valós rugalmassági tulajdonságainak megfelelően pontosabb becslése.

9. Függelékek

Ez a fejezet a homogenizációs modellekhez tartozó egyenleteket, összefüggéseket tartalmazza.

9.1. „A” függelék

Az „A” függelék tartalmazza az irodalomban fellelhető, és általam módosított homogenizációs technikák matematikai megoldóprogrambeli változatát. A modellek hosszúsága miatt az egyenletek a mellékelt CD-n találhatók.

9.2. „B” függelék

A sűrűség-probléma leíró egyenlete:

$$\rho_{val\acute{o}s} = f_{ea} \cdot [(1 - x) \cdot ((1 - \eta^3) \cdot (z \cdot \rho_{lev} + (1 - z) \cdot \rho_{ker\acute{a}mia}) + \eta^3 \cdot \rho_{lev}) + x \cdot ((1 - \eta^3) \cdot (z \cdot \rho_{lev} + (1 - z) \cdot \rho_{ker\acute{a}mia}) + \eta^3 \cdot \rho_m)] + (1 - f_{ea})[(1 - y) \cdot \rho_m + y \cdot \rho_{lev}],$$

ahol

$$\rho_{sziv} = z \cdot \rho_{lev} + (1 - z) \cdot \rho_{ker\acute{a}mia}$$

f_{ea} – erősítőanyag tartalom (-)

$\rho_{ker\acute{a}mia}$ – kerámia sűrűsége

ρ_{lev} – levegő sűrűsége, 20 °C-n (1205 g/cm³)

ρ_m – mátrix sűrűsége (g/cm³)

x – törött gömbhéjak mennyisége (-)

y – mátrixban lévő porozitás mértéke (-)

z – a gömbhéjfal-porozusság mértéke (-)

η – a gömbhéj külső-belső sugarának hányadosa

Az egyenlet matematikai megoldóprogrambeli változata a mellékelt CD-n található.

10. Hivatkozásjegyzék

- [1] Bardella, L., *A phenomenological constitutive law for the nonlinear viscoelastic behaviour of epoxy resins in the glassy state*. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2001. **20**(6): p. 907-924.
- [2] http://www.3m.com/3M/en_US/country-us/?WT.mc_id=www.3m.com/us. 2014.08.03.
- [3] Bardella, L., Genna F., *On the elastic behavior of syntactic foams*. International Journal of Solids and Structures, 2001. **38**(40–41): p. 7235-7260.
- [4] Hervé É., Pellegrini Ó., *The elastic constants of a material containing spherical coated holes*. Archives of Mechanics, 1995. **47**/2: p. 223-246.
- [5] Bardella, L., *An extension of the Secant Method for the homogenization of the nonlinear behavior of composite materials*. International Journal of Engineering Science, 2003. **41**(7): p. 741-768.
- [6] Christensen, R.M., Lo K.H., *Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1979. **27**(4): p. 315-330.
- [7] Eshelby, J.D., Proceedings of the Royal Society, 1957 London. **A241**: p. 376–396.
- [8] Bornert, M., Stolz C., Zaoui A., *Morphologically representative pattern-based bounding in elasticity*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996. **44**(3): p. 307-331.
- [9] Bardella, L., et al., *A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams*. Mechanics of Materials, 2012. **50**(0): p. 53-69.
- [10] Donev, A., Torquato, S., Stillinger, F.H., Connelly, R., *Jamming in hard sphere and disk packings*. J. Appl. Phys., 2004. **95**: p. 989-999.
- [11] Donev, A., et al., *A linear programming algorithm to test for jamming in hard-sphere packings*. Journal of Computational Physics, 2004. **197**(1): p. 139-166.
- [12] Bardella, L., *Discussion on the paper “Simulation of porosity by microballoon dispersion in epoxy and urethane: Mechanical measurements and models” by M. A. El-Hadek and H. V. Tippur*. Journal of Materials Science Letters, 2003. **22**: p. 1643-1646.
- [13] El-Hadek M.A., Tippur H. V., *Simulation of porosity by microballoon dispersion in epoxy and urethane: Mechanical measurement and models*. Journal of Materials Science, 2002. **37**: p. 1649–1660.
- [14] Hashin, Z., Shtrikman S., *A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963. **11**(2): p. 127-140.
- [15] Marur, P.R., *Estimation of effective elastic properties and interface stress concentrations in particulate composites by unit cell methods*. Acta Materialia, 2004. **52**(5): p. 1263-1270.
- [16] Marur, P.R., *Effective elastic moduli of syntactic foams*. Materials Letters, 2005. **59**(14–15): p. 1954-1957.
- [17] Fröhlich H., Sack. R., *Theory of the rheological properties of dispersions*. Proceedings of the Royal Society, 1946. **A 185**: p. 415-430.
- [18] Marur, P.R., *Influence of imperfect interface on the elastic moduli of syntactic foams*. Computational Materials Science, 2009. **46**(2): p. 327-332.
- [19] Marur, P.R., *Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams*. Finite Elements in Analysis and Design, 2010. **46**(11): p. 1001-1007.

- [20] Segurado, J., Llorca J., *A numerical approximation to the elastic properties of sphere-reinforced composites*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002. **50**(10): p. 2107-2121.
- [21] <http://www.hollomet.com/home.html>. 2014.09.11.
- [22] <http://envirospheres.com/splash.asp>. 2014.09.16.
- [23] H.M. Jaeger, S.R.N., *Physics of the Granular State* Science, 1992. **5051**: p. 1523-1531.
- [24] Orbulov, I.N., *Szintaktikus fémhabok, PhD-értekezés*. 2009.
- [25] Pal, R., *New models for effective Young's modulus of particulate composites*. Composites Part B: Engineering, 2005. **36**(6–7): p. 513-523.
- [26] Hashin, Z., Shtrikman S., *On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1962. **10**(4): p. 335-342.
- [27] Lee, K.J., Westmann, R.A., *Elastic properties of hollow-sphere-reinforced composites*. J. Compos. Mater., 1970: p. 242-253.
- [28] Porfiri M., Gupta N., *Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 166-173.
- [29] Orbulov I.N., Dobranszky J., Nemeth A., *Microstructural characterisation of syntactic foams*. J. Mater. Sci. , 2009. **44**(4013-4019).
- [30] Májlinger K., Orbulov I.N., *Elemental and orientation analysis on metal matrix syntactic foams*.
- [31] Orbulov I.N., Dobranszky J., Nemeth A., *XRD and EDS Investigations of Metal Matrix Composites and Syntactic Foams*.